

TARTU ÜLIKOOL  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Arvutiteaduse instituut  
Infotehnoloogia mitteinformaatikutele õppekava

Eva Mõtshärg

**3D-prinditava kere disain ja analüüs vabavaralisele  
haridusrobotile Robotont**

Magistritöö (15 EAP)

Juhendajad:  
Veiko Vunder, PhD  
Renno Raudmäe, MSc

Tartu 2023

## **3D-prinditava kere disain ja analüüs vabavaralisele haridusrobotile Robotont**

**Lühikokkuvõte:** Haridusrobotika maailmas on palju erinevaid roboteid, kuid napib lahendusi, mis sobiksid üheaegselt nii algajale kui edasijõudnud õppurile. Tartu Ülikoolis arendatud Robotont on loodud olema sild kooli- ja tööstusrobotika vahel. Siiski on ka Robotondiga keeruline õpetada paljusid algajatele vajalikke kontseptsioone, kuna platvormi kasutusvõimalused on piiratud ning see ei ole paindlikult muudetav. Samal ajal kogub 3D-printimine järjest populaarsust ja pakub alternatiivi traditsioonilistele tootmismeetoditele. Käesolev magistritöö uurib ja analüüsib Robotondi 3D-printimise otstarbekust. Töö metoodikas rakendatakse välearenduse põhimõtteid, arvutijuhitavaid mõõtmisi ja semantilist versioonihaldust. Töös on lisaks valdkonna teoreetilisele ülevaatele kirjeldatud Robotondi 3D-prinditava kere disainiprotsessi ja põhjendatud tehtud valikuid. Empiiriliste katsete toel töötati välja 3D-printimise protsess, mis tagab Robotondi õppetöös kasutamiseks piisava vastupidavuse. Kasutades töö raames loodud 3D-mudeleid ja optimeeritud G-koodi faile on igapäev võimalik 3D-printida endale oma Robotont ja hõlpsalt kohandada see oma vajadustele vastavaks.

**CERCS** (Common European Research Classification Scheme): P170 Arvutiteadus, arvutusmeetodid, süsteemid, juhtimine (automaatjuhtimisteooria); T125 Automatiseerimine, robotika, control engineering; T130 Tootmistehnoloogia

**Märksõnad:** haridusrobotika, 3D-printimine, välearendus

## **Design and Analysis of a 3D Printable Chassis for the Open Source Educational Robot Robotont**

**Abstract:** In the world of educational robotics, there are many different robots, but also a shortage of solutions that can simultaneously support the learning process of both beginners and advanced learners. Educational robot Robotont, which was created in the University of Tartu, is meant to bridge the gap between school robotics and industrial robotics. However, the current mechanical design of Robotont and difficulty of making alterations limits the range of concepts teachable with the platform, especially in the domain of base concepts. Meanwhile, 3D-printing is gathering momentum as a valid alternative to traditional manufacturing methods. This thesis presents a structured research and analysis into the viability of a 3D-printable Robotont. This work employs the concepts of agile development, computer-based measurements and semantic versioning. In addition to a theoretical overview, this work describes the design process of the 3D-printable Robotont and justifies the decisions made. Based on results from empirical experiments, a process was developed for 3D-printing the chassis of Robotont that can adequately withstand the stress of educational use. Using the 3D models and optimised G-code files created during this thesis, anyone can print their own Robotont and easily adapt it to suit their needs.

**CERCS** (Common European Research Classification Scheme): P170 Computer science, numerical analysis, systems, control; T125 Automation, robotics, control engineering; T130 Production technology

**Keywords:** educational robotics, 3D-printing, agile development

# Sisukord

Sissejuhatus .....	3
Kasutatud lühendid ja märksõnad .....	6
1. Kirjanduse ülevaade .....	8
1.1. Haridusrobotid ja ROS .....	8
1.2. 3D-printimine .....	10
2. Robotont .....	20
2.1. Ajalugu ja eesmärk .....	20
2.2. Gen 2 tootmislahendus .....	21
2.3. Seotud gen 3 arendused .....	21
3. Töö eesmärgid ja nõuded .....	22
3.1. Eesmärgid .....	22
3.2. Nõuded .....	23
4. Metoodika .....	24
4.1. Disainiprotsess .....	24
4.2. Tugevusanalüüs .....	25
4.3. Versioneerimine .....	26
5. Robotont gen 3 keredisain ja analüüs .....	29
5.1. Ülevaade .....	29
5.2. Raamimooduli arendus .....	30
5.3. Mootorimooduli arendus .....	38
5.4. Kaameramooduli arendus .....	40
5.5. Arvutimooduli arendus .....	43
5.6. Analüüs optimaalsete printerisätete leidmiseks .....	45
5.7. Kere tugevusanalüüs .....	51
5.8. Printimine .....	58
5.9. Koostamine .....	60
5.10. Eriotstarbelised arendused .....	63
6. Arutelu ja järeldused .....	65
6.1. Robotondi 3D-printimise eelised ja puudused .....	65
6.2. Versioneerimine .....	67
6.3. Edasised arengusuunad .....	67
Kokkuvõte .....	69
Tänuavaldused .....	71
Viidatud kirjandus .....	72
Lisa 1: Mõõtelaseri ekraanilt lugemi tuvastamise skript .....	83

Lisa 2: Kere disaini- ja tootmisfailid .....	84
Lisa 3: Keredetailide individuaalsed massid ja prindiajad .....	85
Lihtlitsents .....	86

## Sissejuhatus

Tänapäeva tehnoloogiahariduses kasutatakse järjest rohkem roboteid. Uuringud on näidanud, et hariduslike robotite kasutamine toetab õppeprotsessi ning arendab õppurite matemaatilist mõtlemist, tehnilist taipu ja ka sotsiaalseid oskusi [1]. Aastatel 2009—2019 avaldatud haridusrobotika-teemaliste artiklite koguse põhjal näitab selle uurimisvaldkonna populaarsus tõusutrendi [2], mis viitab selle teema kasvavale aktuaalsusele.

Suur osa haridusrobotitest on mõeldud programmeerimise algõppe toetamiseks. Selleks, et õppida looma ja programmeerima keerulisemaid ja rakenduslikult kasutatavaid roboteid, on vaja rohkemate võimalustega haridusroboteid. Üks selline on Tartu Ülikoolis loodud Robotont [3]. Kuna Robotont on loodud olema vabavaraline õppeplatvorm, on oluline tagada Robotondi mugav kättesaadavus. Robotondi kättesaadavust piirab praegu asjaolu, et keredetailide tootmismetoodika kasutab seadmeid, millele enamikul inimestest ei ole ligipääsu. Tööstuslikult toodetud detailide tellimine vaid ühe roboti jaoks oleks aga ebanõistlikult kulukas. Samal põhjusel on aeganõudev ja kallis ka purunenud detailide asendamine ja täiendava funktsionaalsuse lisamine. Robotondi kättesaadavust parandaks Robotondi kodus valmistamise ja parandamise võimalus.

Käesoleva magistritöö autor on tööalaselt seotud mitmete Robotonti kasutatavate hariduslike projektidega, näiteks 2022. aasta sügisel esmakordselt toimunud vaba juurdepääsuga veebikursusega "ROSi algkursus" (ROSAK) [4, 5]. Kursusel õpetati vabavaralise tarkvararaamistiku ROS (*Robot Operating System*) kasutamist Robotondi peal tehtavate ülesannete kaudu. Õppurid viibisid oma kodudes ja juhtisid kaugteel Tartu Ülikooli klassiruumis paiknevaid Robotonte. Õppetöö läbiviimisel selgus, et Robotont — kuigi olles võimekas platvorm — on piiratud selle peal läbiviidavate erinevate ülesannete hulga mõttes. Robotont võimaldab õppida roboti juhtimist ning teha kaamerapildil põhinevaid ülesandeid nagu lokaliseerimine ja kaardistamine. Kaamera on aga oma olemuselt edasijõudnute tasemele mõeldud andur, kuna annab kasutajale väga palju infot korraga. Kursuse käigus tekkis selge vajadus standardsete lisaseadmete ühendamise järele, mis võimaldaks keskkonda sügavuskaamerast lihtsamatel meetoditel tajuda ja ka mõjutada. Ilma Robotondi keret kahjustamata on lisaseadmete kindlalt kinnitamine keeruline. Algajate tarbeks oleks kasulik, kui Robotondile oleks kerge lisada ka lihtsamaid seadmeid, mille näitel oleks võimalik omandada baasteadmisi andurite ja täiturite kasutamisest.

3D-printimise areng on loonud uusi võimalusi kiireks ja paindlikuks disainiks, kuid Robotondi tootearenduses on seda seni vähe rakendatud. Robotondi disaini muutmine uue funktsionaalsuse lisamiseks on töömahukas, kuna keredetailid toodetakse *router*-tüüpi CNC (*Computer Numerical Control*) freesiga ja disaini muutmiseks on vaja tellida uus detail või puurida käsitsi auke juurde. 3D-

prinditava kere puhul oleks moodulite lisamine ja disaini muutmine lihtsam, sest lühikese aja jooksul oleks võimalik ise toota uus detail. Hobikasutaja 3D-printerite hinnad jäävad vahemikku 400—1500 eurot, kõige odavamate printerite hinnad algavad 100 eurost [6]. Hobikasutaja *router*-tüüpi CNC-freeside hinnad on 1000—3000 eurot, kõige odavamate hinnad algavad 150 eurost [7]. Kuigi hobikasutajale mõeldud 3D-printerite ja CNC-freeside hinnad jäävad samasse suurusjärku, on CNC-frees siiski tööstuslik seade, mis on ümbritsevatele inimestele ja keskkonnale ohtlik, kuna teeb kasutamisel tugevat müra ja freesitera alt lendab suurel kiirusel materjalilaste. Samuti vajab CNC-freesi seadistamine oskusteavet. Seetõttu on isegi odav CNC-frees kodukasutajale reeglina sobimatu. 3D-printer sobib aga ka kodus kasutamiseks hästi. 3D-prinditava kere loomine suurendab seega lisaks kättesaadavusele oluliselt ka koolis või kodus Robotondile lisafunktsionaalsuse loomise võimalusi.

Õppurite huvi robotika vastu sõltub nende enesekindlusest ja usust oma võimetusse [8]. Robotondist 3D-prinditava versiooni pakkumine annab õppurile võimaluse ise oma roboti kokkupanemiseks, sest keredetailid on valdavalt ise toodetavad. Kere tootmisprotsessi nägemine ja ise juhtimine, samuti roboti kokkupanemine tugevdavad loodetavasti õppuri usku oma võimekusse roboti kasutamisel ning demüstitseerivad robotite valmistamist. 3D-printimine muudab ka kergemaks erinevate värvikombinatsioonidega Robotontide valmistamise, mis võib tõsta Robotondi atraktiivsust. 2019. aastal viidi Kreekas läbi haridusrobotika töötuba ja uuring selle kohta, millist haridusrobotit osalejad eelistaksid. Uuringu tulemusel selgus, et 50% osalejatest eelistavad oma haridusroboti 3D-printida ja 92% eelistavad vabavaralist tark- ja riistvara [9].

Käesolevas töös rakendatakse raalprojekteerimist (edaspidi CAD, *Computer-Aided Design*), välearendust, arvutijuhitavaid mõõtmisi, masinnägemist ja semantilist versioneerimist. CAD võimaldab reaaleluliste süsteemide arvutis modelleerimist ja interaktiivset disainivariantide analüüsi ning optimeerimist, samuti disaini väljendamist tootmiseks sobivas formaadis [10]. Autodeski asutaja John Walker on kirjeldanud CAD-i kui arvutiteaduse südant, sest kõige kõrgemal tasemel võimaldab CAD modelleerida kogu maailma [10]. CAD-i kasutatakse käesolevas töös 3. generatsiooni Robotondi (edaspidi gen 3) kere disainimiseks ja interaktiivseks optimeerimiseks, kasutades arvutipõhiseks tootearenduseks loodud 3D-modelleerimise tarkvara SolidWorks [11]. Disainiprotsessis toetutakse välearenduse [12] põhimõtetele, tagades iteratiivse lähenemise käigus ennekõike toimiva lahenduse olemasolu igas arendusetapis ning säilitades paindlikkust disaini pidevaks täiendamiseks. Arvutijuhitavate ja masinnägemist kasutavate mõõtmiste abil hinnatakse erinevate 3D-printeri sätetega prinditud detailide jäikust. Keredisaini haldamiseks võeti kasutusele semantilisel versioneerimisel [13] (SemVer, ingl *Semantic Versioning*) põhinev versiooninumbrite süsteem, mis pakub vajalikku struktuuri arenduse toetamiseks ja läbinähtavalt kommunikeerimiseks.

Käesoleva magistritöö uurimisküsimus on järgnev: kas Robotondile on võimalik luua senise kerega võrreldava vastupidavusega 3D-prinditav kere, säilitades Robotondi visuaalset identiteeti, optimeerides tootmiskulusid ja parandades tootmise kättesaadavust laiemale kasutajate hulgale? Käesoleva magistritöö esimene eesmärk on CAD modelleerimise abil disainida 3D-prinditavad keredetailid vabavaralisele haridusrobotile Robotont. Töö teine eesmärk on empiirilise tugevusanalüüsi toel optimeerida 3D-printeri sätteid kere sobiva vastupidavuse saavutamiseks. Käesoleva töö tulemusel valmib gen 3 kere koos selle 3D-printimiseks vajalike failidega.

Töö on jaotatud järgnevateks peatükkideks. [Kasutatud lühendid ja märksõnad](#) koondab kõiki töös mainitud lühendeid ning nende inglise- ja eestikeelseid vasteid. [Peatükk 1](#) annab lühiülevaate haridusrobotika olulisusest ja 3D-printimisest kui tootmistehnoloogiast. Peatükis kirjeldatakse enamlevinud 3D-printimise meetodeid ja populaarsemaid materjale, pannes rohkem rõhku käesolevas töös kasutatud tehnikale ja materjalidele. Seejärel tuuakse välja 3D-printimise eeliseid ja nõrkusi võrreldes alternatiivsete tootmisvõimalustega. Viimaks tuuakse mõned näited 3D-printimise rakendamisest haridusrobotika kontekstis. [Peatükk 2](#) tutvustab robotplatvormi Robotont, selle seisu käesoleva magistritöö alguses ning kirjeldab lühidalt arendusi, mis mõjutavad käesolevat tööd, kuid pole selle osaks. [Peatükk 3](#) sõnastab töö eesmärgid ja töö tulemusele seatud nõuded. [Peatükk 4](#) tutvustab gen 3 kere disainimiseks kasutatud tarkvara ja 3D-printerit, samuti annab üldise ülevaate keredetailide tugevuse hindamiseks läbi viidud katsete meetodikast ja kirjeldab välja töötatud versioneerimissüsteemi. [Peatükk 5](#) koondab endas töö praktilise osa tulemused, sisaldades detailset kirjeldust gen 3 kere arenduse olulistest osadest ja tehtud tugevuskatsete tulemustest. [Peatükk 6](#) toob välja töö tulemusel kujunenud järeldused ja sõnastab mõned võimalikud arendus- ja uurimissuunad edasise töö jaoks. [Kokkuvõte](#) võtab käesoleva magistritöö kokku. Töö lisamaterjalid asuvad avalikus Githubi repositooriumis. Töö lisadesse on paigutatud veebilink avaliku repositooriumi kaustale, kus asub eksperimendi läbiviimiseks kasutatud skripti lähtekood ([Lisa 1](#)), ja sama repositooriumi teisele kaustale, kus on leitavad töö käigus valminud mudeli- ja printimisfailid ([Lisa 2](#)). [Lisa 3](#) sisaldab tabelit töö käigus loodud mudelite individuaalsete masside ja printiaegadega.

## Kasutatud lühendid ja märksõnad

Lühend	inglisekeelne vaste	eestikeelne vaste
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene	akrüülnitriil-butadieenstüreen
AM	Additive Manufacturing	kihtlisandustehnoloogia
API	Application Programming Interface	rakendusliides
ASA	Acrylonitrile Styrene Acrylate	akrüülnitriil-stüreen-akrülaat
CAD	Computer-Aided Design	raalprojekteerimine
CAM	Computer-Aided Manufacturing	raaltootmine
CNC	Computer Numerical Control	arvprogrammjuhtimine
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	metalli laserpaagutus
EMB3D	Embedded 3D Printing	manusprintimine
FDM	Fused Deposition Modeling	sulatatud sadestamise modelleerimine
gen 1	Robotont Generation 1	1. generatsiooni Robotont
gen 2	Robotont Generation 2	2. generatsiooni Robotont
gen 2.1	Robotont Generation 2.1	2.1. generatsiooni Robotont
gen 3	Robotont Generation 3	3. generatsiooni Robotont
HSV	Hue, Saturation, Value	värvitoon, küllastatus, heledusväärtus
IFR	International Federation of Robotics	Rahvusvaheline Robotika Föderatsioon
IMU	Inertial Measurement Unit	inertsiaalandur
LED	Light-Emitting Diode	valgusdiod
LiDAR	Light Detection and Ranging	laserlokaator
LiPo	Lithium Polymer	liitiumpolümeer
PCB	Printed Circuit Board	trükkplaat
PEEK	Polyetheretherketone	polüeteereeterketoon
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol	polüetüleen tereftalaatglükool

<b>Lühend</b>	<b>inglisekeelne vaste</b>	<b>eestikeelne vaste</b>
PLA	<b>P</b> oly <b>l</b> actic <b>A</b> cid	polüpiimhape
RIHA	administration system for the state information system	<b>riigi infosüsteemi haldussüsteem</b>
ROI	<b>R</b> egion of <b>I</b> nterest	huvipakkuv ala
ROS	<b>R</b> obot <b>O</b> perating <b>S</b> ystem	-
ROSAK	-	<b>ROS-i algkursus</b>
SemVer	<b>S</b> emantic <b>V</b> ersioning	<b>semantiline versioneerimine</b>
SLA	<b>S</b> tereolithography	stereolitograafia
SLM	<b>S</b> elective <b>L</b> aser <b>M</b> elting	selektiivne lasersulatus
SLS	<b>S</b> elective <b>L</b> aser <b>S</b> intering	selektiivne laserpaagutus
STEAM	<b>S</b> cience, <b>T</b> echnology, <b>E</b> ngineering, <b>A</b> rts and <b>M</b> athematics	matemaatika-teadus-tehnoloogia-inseneeria-kunst
STEM	<b>S</b> cience, <b>T</b> echnology, <b>E</b> ngineering and <b>M</b> athematics	loodus- ja täppisteadused
STL	<b>S</b> tandard <b>T</b> riangle <b>L</b> anguage	-
UV	<b>U</b> ltraviolet	<b>ultraviolet</b>

# 1. Kirjanduse ülevaade

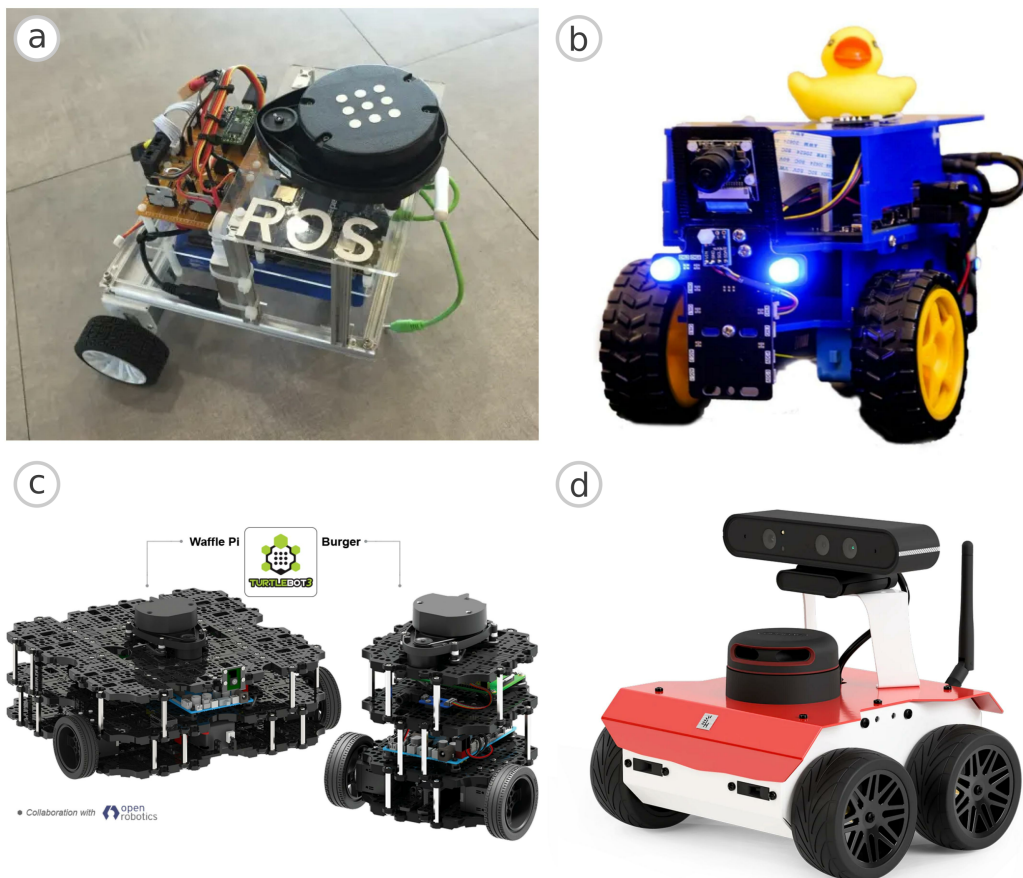
See peatükk esitab ülevaate haridusroboti 3D-printimise temaatikas olulisest kirjandusest. Esmalt käsitletakse haridusrobotite kui õppevahendite kasulikkust ja tuuakse näiteid Robotondiga sama tarkvararaamistikku kasutatavatest haridusrobotitest. Seejärel tutvustatakse mõningaid laiemalt kasutatud 3D-printimise meetodeid ja materjale, pannes suuremat rõhku käesolevas töös kasutatatuile, andmaks ülevaadet valitud meetodil 3D-printimise olulistest nüanssidest. Peale tehnoloogia tutvustamist võrreldakse 3D-printimist teiste asjakohaste tootmismeetoditega. Lõpetuseks tuuakse näiteid 3D-printimise rakendamiseest robotika valdkonnas, keskendudes eriti 3D-printimise rakendamiseest tulenenud lisandväärtusele.

## 1.1. Haridusrobotid ja ROS

Kogu maailmas on näha robotite hulga suurenemist. IFR (*International Federation of Robotics*) andmetel [14] võeti 2021. aastal kasutusele üle poole miljoni uue tööstusliku roboti. Aastatel 2016—2021 kasvas iga-aastane uute kasutuselevõetud tööstuslike robotite arv keskmiselt 11% aastas. Tööstusrobotite koguarv on neil aastatel näidanud kasvu keskmiselt 14% aastas, ulatudes 2021. aastal 3,5 miljonini. 2030. aastaks prognoositakse mobiilse robotika turuosa kasvu *ca* 25 miljardi USD-ni, aastase kasvuga *ca* 21% [15], ja globaalse robotikaturu kasvu 214 miljardi USD-ni, aastase kasvuga *ca* 23% [16]. Selleks, et õpetada välja spetsialiste nende robotite programmeerimiseks ja haldamiseks, on vaja haridusroboteid.

Haridusrobotika üldine eesmärk on aidata igas vanuses õpilastel omandada teadmisi robotikast ja programmeerimisest, arendades samaaegselt ka teisi kognitiivseid oskusi nagu koostööoskus, loovus, kriitiline mõtlemine ja enda tegevuse mõtestatud hindamine [17]. Haridusrobotika kuulub STEAM (*Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics*) õppe hulka, mille fookuses on tänapäeva tööturul vajalike valdkondade teadmiste õpetamine praktiliste tegevuste kaudu. Kirjanduses on arvukalt näiteid õppeprotsessis robotite kasutamise positiivsest mõjust õpilaste motivatsioonile, suhtumisele ja õpitulemustele [8, 18, 19, 20, 21, 22]. Erinevaid hariduslikke roboteid on palju. Bilotta *et al* põhjendasid robotite pedagoogilist väärtust sellega, et robotid motiveerivad õpilasi, sest on konkreetset, kompleksed ja seonduvad inimlike vajadustega [23]. Chatzopoulos *et al* töid olemasolevate haridusrobotite piirangutena välja kõrge hinna, mootorite ja andurite lisamise võimaluse puudumise, suletud lähtekoodiga tarkvara, mitteavaliku disainiga riistvara, püsiva internetiühenduse vajaduse ja kohustuse laadida alla lisaprogramm roboti kasutamiseks [24]. Haridusroboteid, mille disainifailid pole avalikud, ei ole arenduskogukonnal enamasti võimalik ilma olemasolevaid detaile rikkumata kergelt muuta, samuti pole nende ehituses pööratud tähelepanu sellele, et keredetailid oleks 3D-prinditavad.

Üks enimkasutatavaid robotika tarkvararaamistikke on ROS (*Robot Operating System*) [25], mis loodi 2007. aastal ja mis pakub abstraktsioonikihti sõnumite vahetamiseks süsteemi eri osade vahel ning laia valikut arendustööriistu [26]. ROS-i abil saab kasutaja ligipääsu suurele hulgale ROS-i kimpudele ehk valmis tarkvarale, mida on tänu ROS-i raamistikule lihtne uutesse projektidesse integreerida. Lisaks pakub ROS häid simulatsiooni- ja visualiseerimistööriistu, mille kasutamine kiirendab arendus- ja vigade leidmise protsessi. ROS-põhise robotika turuosa aastal 2021 hinnatakse ligikaudu 43 mld USD suuruseks [27], mis on suurem kui näiteks terve tööstusrobotika turuosa, mida hinnatakse *ca* 32 mld USD suuruseks [28].



*Joonis 1. Näited ROS-i toega mobiilsetest haridusrobotitest: Linorobot (a), Duckiebot (b), TurtleBot3 (c), ROSbot (d)*

Kuigi ROS on rakenduslikus robotikas laialdaselt kasutusel, ei ole enamikul haridusrobotitest ROS-i tuge. Mobiilsetest haridusrobotitest on ROS-i toega näiteks väikesed ise kokkupandavad Linorobotid (Joonis 1a), mille tükkidest saab ehitada erineva kujuga roboteid ja mille eesmärk on pakkuda madala hinnaga platvormi ROS-i õppimiseks [29]. Kaamerapildi põhjal linnaruumis liikumise õpetamiseks on loodud Duckiebot (Joonis 1b), mis on osa suuremast Duckietown projektist [30]. Duckieboti uus versioon põhineb Nvidia Jetson Nano miniarvutil, mis võimaldab ka masinõppe algoritmide

rakendamist. Üks tuntumaid ROS-i toega haridusroboteid on TurtleBot3 (Joonis 1c), mis on muudetava kujuga ja anduritest sisaldab kaamerat, 360-kraadist laserandurit ja 9-teljelist IMU (*Inertial Measurement Unit*) [31]. Robotist on ka uus versioon — TurtleBot4 — mis on mõeldud ROS2 õppimiseks [32]. Autonoomsete sõidukite programmeerimise õppimiseks on ROSbot (Joonis 1d), millel on nii LiDAR, sügavuskaamera kui ka infrapunaandurid [33]. Nende robotite disainis ei ole aga pandud rõhku funktsionaalsuse kohandatavusele ega võimalusele hõlpsalt kandekonstruktsiooni muuta. Sellise võimaluse saaks lisada 3D-prinditava disainivariandi kaudu, et iga kasutaja saaks soovi korral täiendada oma robotit talle vajalikul viisil.

## 1.2. 3D-printimine

3D-printimine on defineeritud kui "objektide tootmine prindipea, -otsiku või muu printimistehnoloogia abil materjali lisamise kaudu" [34]. 3D-printimine on kihtlisandustehnoloogia (ingl *additive manufacturing*, AM) meetod. AM on defineeritud kui "materjalide ühendamise protsess 3D-mudeli info põhjal objektide loomiseks, tavaliselt kihthaaval, vastupidiselt materjali eemaldavatele tootmismeetoditele" [34].

3D-printimisel on alguspunktiks CAD mudel arvutis, mis kujutab kolmemõõtmelist objekti. Sellest luuakse STL faililaiendiga dokument, mis on AM süsteemides kasutatav standardformaad ja mis kirjeldab 3D-mudelit kolmnurksete pindade kaudu, jättes kõrvale spetsiifilisemad CAD mudeli detailid [34]. Spetsiaalse viilutamistarkvaraga (ingl *slicer*) luuakse mudelist printerile arusaadav juhised G-koodi kujul. G-kood on programmeerimiskeel automatiseeritud seadmete juhtimiseks. 3D-printeri puhul on G-koodi eesmärk samm-sammuliselt kirjeldada, millise trajektooriga peab printeri otsik liikuma ja kui palju materjali väljutama. G-koodi abil saab panna 3D-printeri printima kas ühe või mitu detaili korraga või ka ainult soovitud osa detailist.

### 1.2.1. Enimlevinud 3D-printimise meetodid

3D-printimise tehnoloogiad erinevad kihtide lisamise meetodi, tööpõhimõtte ja kasutatavate materjalide poolest [35]. Tabel 1 annab ülevaate enimkasutatavate printimismeetodite [36] puhul kasutatavatest materjalidest ja prinditavate kihtide paksustest.

3D-printimise isaks peetakse Charles Hull'i, kes 1983. aastal leiutas stereolitograafia ja asutas firma 3D Systems, mis tegi 1987. aastal esimese 3D-printeri SLA-1 [37]. SLA meetodil valmistatakse UV valguse mõjul tahkuvatest fotopolümeeridest objekte, mis on piisavalt tugevad, et neid saab detaili lõpliku kuju saavutamiseks järeltöödelda materjali eemaldavate tootmismeetodite abil ja kasutada näiteks survevaluvormide tootmisel [37].

Tabel 1. Levinumate 3D-printimise meetodite omadused

Meetod	Materjal	Kihi paksus (mm)
FDM ( <i>Fused Deposition Modeling</i> )	Termoplastne filament [34]	0,05—0,4 (tavaliselt 0,2) [38]
SLS ( <i>Selective Laser Sintering</i> )	Polümeeripulber (plastik, nailon, keraamika, klaas ja metall) [37]	0,07—0,5 (tavaliselt 0,1) [36]
SLM ( <i>Selective Laser Melting</i> )	Metallipulber (roostevaba teras, alumiinium, titaan, koobalti- ja niklipõhised sulamid) [39]	0,02—0,1 [40]
SLA (stereolitograafia)	Fotopolümeerne vaik [41]	0,01—0,1 [42]

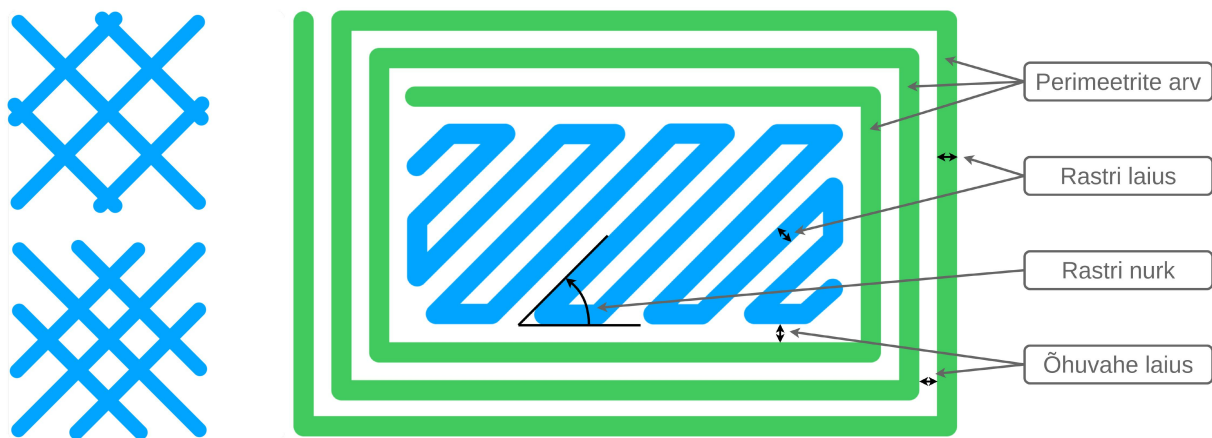
SLS meetodi leiutas 1980-ndatel Carl Deckard, kuid laiemalt on seda hakatud kasutama alates 2013. aastast [36]. Detaili valmistamiseks kuumutatakse kihthaaval pulbrit laseriga peaaegu pulbri sulamistemperatuurini, mille tulemusel settib kuumutatud pulber kokku tahkeks kehaks, kuid ei toimu olekumuutust [37].

SLM meetodil detailide tootmiseks kasutatakse metallipulbrit, mis sulatatakse laseriga või elektroniirega [43]. Erinevalt SLS tehnikast kuumutatakse pulber sulamiseni ehk toimub olekumuutus tahkest vedelaks. SLM meetodil saab printida ainult piiratud hulga metallidega, sest detailide tootmisel jahtuvad kuumutatud piirkonnad väga kiiresti, mille tulemusel tekivad materjalis sisemised pinged [39].

FDM meetodi leiutas Stratasys Inc ning meetod on defineeritud kui "materjali väljutamise protsess termoplastikust detailide tootmiseks kuumutatud materjali kihthaaval lisamise kaudu" ehk lühidalt termoplastse filamendi kihthaaval sadestamine [34]. Termoplastid on polümeerid, mis kuumutamisel muutuvad pehmeks ja jahtumisel uuesti tahkeks ilma materjaliomaduste olulise muutuseta. Filament on termoplastist valmistatud katkematu lõim, mis on keritud pooli peale ja on kõige sagedamini 1,75 mm või 2,85 mm diameetriga [44]. FDM on üks kõige laialdasemalt kasutatud 3D-printimise meetodeid, sest printimistehnika on lihtne ja kasutab odavaid filamente ning prinditud detailide täpsus ja tugevus on siiski muljetavaldav, samuti on mitmed filamendid keskkonnasõbralikud [45]. Printimisel annab parima tulemuse kihi paksus, mis on 25—75% otsiku diameetrist [38]. Kuigi ka SLA on teadlikumate kasutajate seas populaarne, on kodukasutajate hulgas kõige levinum 3D-printimise meetod FDM [46], mida on põhjalikumalt tutvustatud järgnevas alampeatükis.

### 1.2.2. FDM 3D-printimine

FDM protsessi ja sel viisil toodetud detailide kvaliteeti määravaid tegureid on põhjalikult kirjeldatud Penumakala *et al* ülevaateartiklis [47], millel käesolev lõik põhineb. FDM meetodi puhul toimub printimine kuuma otsiku abil, mis sulatab otsikust läbi surutavat filamenti, mis omakorda kantakse kihthaaval prinditava detaili peale. Iga kiht prinditakse tasapinnalisena ning kihtide üksteise peale printimine tagab detaili kolmemõõtmelisuse. Kihid seonduvad omavahel ja moodustavad terviku. Detaili tugevus sõltub ühe kihi raames filamentide ja ka järjestikuste kihtide omavaheliste seoste kvaliteedist. Jahtumise käigus tekivad kihtide vahele tühemikud, mis nõrgestavad prinditud detaili. Kuna detaile prinditakse kuumutatud aluspinna peale, on kõrgemate ja madalamate kihtide temperatuur erinev. See põhjustab tahkumisel kokkutõmbumise ebahühtlust ja pingeid detailis. Temperatuurierinevustest tulenevate pingete leevendamiseks on printimiskamber tihti samuti kuumutatud. Printimisel olulised parameetrid on printimise suund ehk millise külje peale on detail paigutatud, kihi paksus, sisetäite (ingl *infill*) tihedus, perimeetrite arv detaili väliskülgedel, rastrite laius, rastrite nurk ja õhuvahe ühe kihi piires (vt Joonis 2). Otsiku diameeter on tavaliselt 0,4 mm, mis annab rastri laiuseks samuti 0,4 mm. Soovituslik on printida olematu õhuvahega, s.t nii, et filamentide vahel ei ole ei vahet (positiivne õhuvahe) ega ülekatet (negatiivne õhuvahe).



Joonis 2. Sisetäite tiheduse näited (vasakul) ja 3D-printeri otsiku teekond ühes kihis (paremal). Nooltega on näidatud mõned printimisel olulised parameetrid.

Bellini ja Guceri [48] kirjeldasid detaili orientatsiooni ja printimise suuna valiku mõju rastritevaheliste sidemete moodustumisele. Nad leidsid, et prinditud detailid on vastupidavamad jõudude suhtes, mis rakenduvad printimissuunaga risti ja nõrgemad printimissuunas rakenduvate jõudude suhtes, sest filamentirajad on tugevamad kui nendevahelised ühendused. Gurralla *et al* tegid sarnaseid katseid ja leidsid, et esineb korrelatsioon detaili tugevuse ning rastrite- ja kihtidevaheliste ühenduste moodustumise vahel; nemad leidsid aga, et kuigi prinditud detailid on mõnevõrra vastupidavamad printimissuunaga ristiolevate vs samas suunas rakenduvate jõudude suhtes, ei mõjuta printimissuuna

valik detaili tugevust olulisel määral [45]. CNC Kitchen [49] tegi katseid Prusament PLA-st, PETG-st ja ASA-st printitud testkonksudega. Nad leidsid, et horisontaalselt printitud detailid suutsid kanda vastavalt 82%, 120% ja 235% suuremat raskust kui samad detailid vertikaalselt printituna.

Rodríguez-Panes *et al* uurisid kihi paksuse, sisetäite tiheduse ja printimise suuna mõju PLA-st ja ABS-st printitud detailide mehaanilistele omadustele [50]. Nad leidsid, et uuritud parameetritest kõige olulisema mõjuga on sisetäite tihedus. Sisetäite tihedus saab varieeruda 0—100% vahel. Saavutamaks parimat tasakaalu detaili tugevuse, prindiaja ja materjalikulu vahel ei ole enamasti mõistlik suurendada sisetäite tihedust üle 40%, vaid suurema tugevuse saamiseks on parem lisada juurde perimeetreid [51]. Sisetäidet on ka võimalik printida erinevate mustritena. Fernandez-Vicente *et al* uurisid erinevate sisetäitemustrite ja -tiheduste mõju ja leidsid, et sama tiheduse juures varieerub eri mustritega printitud detailide tõmbetugevus ainult 5% [52]. Samas näitasid Birosz *et al*, et sõltuvalt sisetäitemustri keerukusest võib prindiaeg erineda üle kahe korra, samuti tõuseb sisetäite protsendi suurendamisel prindiaeg keerukamate mustrite puhul rohkem kui lihtsate, vähem prindipea erisuunalist liikumist vajavate mustrite puhul [53]. Üks kiiremaid ja töökindlmaid sisetäitemustreid on sirgjooneline (ingl *rectilinear*) muster [51].

Ka printimistemperatuurid mõjutavad tulemuse kvaliteeti ning erinevad printerid printivad sama mudelit erinevalt. Näiteks esineb 3D-printimisel sageli elevandijalaks nimetatavat probleemi, mida on ka praktikas käsitletud [54]. Elevandijalg tekib printimisel detailide alaserva, muutes detailid alt laiemaks kui mujalt. Elevandijalga põhjustab asjaolu, et printimisala on detaili nakkuvuse tarbeks kuumutatud ja seetõttu on printitava detaili alumised kihid ülemistest soojemad. Kõige alumised kihid saavutavad oma lõpliku tugevuse alles printimisala jahutamisel, mis põhjustab aga selle, et kergelt pehmed alumised kihid vajuvad ülejäänud detaili raskuse mõjul pisut laiemaks, tekitades elevandijala. Elevandijala vältimiseks lisatakse detailide alaserva tihti väike 45-kraadine faas, mis tagab selle, et alumiste kihtide laienemisel ei muutu need mitte ülejäänud detailist laiemaks, vaid saavutavad sama laiuse. Samuti on elevandijalga võimalik vältida kuumutatud printimisaluse temperatuuri langetamisega [54].

3D-printerite tootja UltiMaker pakub ühe võimaliku FDM 3D-printerite jaotuse, jaotades printerid säästu- (100—400 eurot), hobikasutaja- (400—1 000 eurot), asjaarmastaja- (1 000—3 000 eurot), professionaali- (3 000—10 000 eurot) ja tööstuskategooriatesse (10 000+ eurot) [55]. Säästukategooria printerite kohta tuuakse peamise miinusena välja printimisprobleemide sage esinemine ja ebamugav kasutajakogemus. Hobikasutaja printereid kirjeldab UltiMaker kui printereid, millega on võimalik saavutada häid tulemusi tavaliste materjalidega, kuid see eeldab ajamahukat seadistust ja keerukat materjali vahetamise protsessi. Asjaarmastaja kategooria peamise tugevusena toob UltiMaker välja printeri töökindluse ja võimaluse saavutada häid tulemusi mitme erineva materjaliga. Professionaalse

kategooria printereid kirjeldab UltiMaker kui usaldusväärseid masinaid, millel on kõrge korratavus ja mille võib muretult jätta tööle mitmeteks päevadeks, samuti on neil tihti lisafunktsionaalsusi nagu korruga mitmest materjalist printimise võimalus. Tööstuslike printerite eelisena toob UltiMaker välja spetsiifiliste materjalide printimise võimekuse.

Kodukasutajal puudub reeglina vajadus spetsiifiliste materjalide järele. Järgnevalt on toodud ülevaade enimlevinud materjalidest FDM printimisel ja analüüsitud nende sobivust kodukasutajale.

### 1.2.3. FDM 3D-printimise enimkasutatavad materjalid

FDM jaoks kasutatavad filamendid jagunevad nende koostise alusel kaheks: puhtast polümeerist filamendid ja komposiitfilamendid [56]. Enimkasutatavad materjalid FDM printimises on PLA (polüpiimhape), ABS (akrüülnitriil-butadieenstüreen), ASA (akrüülnitriil-stüreen-akrülaad) ja PETG (polüetüleen tereftalaatglükool); parimate omadustega tulemuse saavutamiseks kasutatakse sageli PEEK-i (polüeteereeterketoon) [57]. Nende materjalide füüsilisi omadusi ja printimistingimusi koondab Tabel 2.

*Tabel 2. Enimlevinud FDM materjalide printimistingimuste võrdlus. Kõik andmed on toodud üksikute näidete alusel ja ei defineeri üheselt kõikide tootjate kõiki materjale. Tabel põhineb järgnevatel allikatel: [57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 49].*

Materjal	Elastsus- moodul (GPa)	Tõmbe- tugevus (MPa)	Tihedus (g/cm <sup>3</sup> )	Pehme- nemis- tempera- tuur (°C)	Printimis- tempera- tuur (°C)	Printimis- aluse tempera- tuur (°C)	Suletud kambri vajadus	1 kg hind (€)
PLA	3,5	50	1,3	60	160—230	60—70	ei	15—20
PETG	2,2	53	1,3	80	220—250	85—90	ei	20—25
ABS	2,0	41	1,0—1,4	100	215—275	100—120	jah	20—35
ASA	2,6	55	1,1	100	250—270	105—115	jah	35
PEEK	4,0	97	1,3	240	340—440	120—150	jah	350—700

PLA on bioloogilisest materjalist toodetud ja biolagunev termoplastiline polümeer, mille peamiseks puuduseks on makromolekulaarse struktuuri kahjustumine temperatuuridel üle 200 °C [57]. PLA-d on lihtne printida, kuna vajab printimiseks madalaid temperatuure ning ei vaja kuumutatud kambrit; see on

samas ka miinuseks, kuna PLA pehmeneb juba 60 °C juures [58]. PLA-st prinditud detailid pigem murduvad kui väänduvad, sest PLA on võrdlemisi jäik (Youngi elastsusmoodul 3,5 GPa) [59]. Kõrge elastsusmooduliga materjalide plastse deformatsiooni jaoks on vaja suuremat jõudu kui madala elastsusmooduliga materjalide puhul. Elastne deformatsioon on moondumine, mis pärast moondumise põhjustanud jõu mõju lõppemist kaob; plastne deformatsioon säilib ka pärast jõu mõju lõppemist [70].

ABS ei ole biolagunev ja eritab printimisel mürgiseid gaase [57], kuid materjal on tugev ja vastupidav löökidele [71]. ABS-st prinditud detailid pigem painduvad, mitte ei murdu, kuid printimine on keeruline, kuna ABS on väga tundlik temperatuurikõikumistele, suure deformeerumisriskiga ja vajab printimisel kuumutatud kambrit [59].

PETG on ABS-ga sarnane ja murdumise asemel pigem paindub, kuid ei erita printimisel mürgiseid aineid [59]. PETG ei tõmbu jahtudes olulisel määral kokku ega väändu, mistõttu sobib ka suurte detailide printimiseks [61]. Printimisel moodustab PETG tihti niite prinditud alade vahele, mis tingib vajaduse detaili printimisjärgselt puhastamiseks [59].

ABS-i edasiarendus on ASA, mis on ABS-ist parema UV-kindlusega, väändub vähem ja lõhnab printimisel vähem [64]. ASA pehmeneb alles 100 °C juures ja sobib UV-kindluse tõttu ka õues kasutamiseks, mis muudab selle heaks valikuks tehniliste detailide printimisel [72]. Kuigi vähem kui ABS-i puhul, moonduvad detailid ASA-st printimisel siiski temperatuurikõikumiste tõttu, samuti eritab ASA printimisel mürgist ainet stüreeni [64]. Lisaks vajab ASA hea kihtidevahelise seondumise saavutamiseks kuumutatud kambrit [49].

PEEK on bioloogilisest materjalist toodetud, kuid mitte biolagunev materjal, hea temperatuuritaluvusega ja mehaaniliselt tugev [57]. Sellele vaatamata on PEEK-ist printimine keeruline, sest see vajab nii printimisotsiku kui -aluse kõrget temperatuuri (vt Tabel 2) ning kuni 120 °C kuumutatud kambrit [60]. Peamised rakendusvaldkonnad on lennuki-, auto- ja meditsiinitööstus.

Võrreldes kirjeldatud materjale (Tabel 2) on näha, et suurima temperatuuritaluvuse, elastsusmooduli ja tõmbetugevusega on neist materjalidest PEEK, kuid oma kõrge hinna ja printimiseks vajalike kõrgete temperatuuride tõttu ei ole see kodukasutajale sobiv. Hinna poolest kõige kättesaadavam on PLA, mille elastsusmoodul on võrreldavatest materjalidest PEEK-i järel kõige suurem. PLA-d on kerge printida ja see ei vaja printimisel soojust hoidvat kambrit, mida kodukasutajal võib olla keeruline hankida. PLA puuduseks on madal pehmenemistemperatuur. Kuna roboti mootorid kuumenevad kasutamise käigus ja seetõttu võivad nendega otsekontaktis olevad PLA-st prinditud detailid deformeeruda, oleks need detailid parem printida temperatuurikindlamast materjalist. Soojust hoidva kambri vajaduse puudumise tõttu on nende detailide printimiseks atraktiivne variant ka PETG, mis on temperatuurikindlam kui PLA,

pehmenedes alles 80 °C juures. Kogu roboti printimiseks ei ole PETG hea variant, kuna sellel on madal elastsusmoodul, mis tähendab, et PETG-st detailid deformeeruvad väiksema jõu mõjul kui PLA-st detailid. ASA elastsusmoodul on kõrgem kui PETG-l, kuid madalam kui PLA-l, tõmbetugevus on PETG-ga võrreldav. ASA eeliseks on kõrge pehmenemistemperatuur, mistõttu võiks see olla heaks variandiks mootoritega otsekontaktis olevate detailide printimisel. Kuna aga ASA eritab printimisel mürgiseid aineid, ei ole see kodukasutaja vajadusi silmas pidades sobiv materjal. ASA on ka ligi kaks korda kallim kui PLA, mistõttu ei oleks terve roboti ASA-st printimine ka kuluefektiivne. ABS ei ole samuti kodukasutajale hea variant, kuna eritab printimisel mürgiseid aineid ning on võrreldavatest materjalidest ka kõige madalama elastsusmooduliga.

Eraldi arengusuund 3D-printimises on komposiitmaterjalide kasutamine, mis võimaldab rakendada korraga mitme materjali kasulikke omadusi [36]. Näiteks Anisoprint 3D-printeriga [73] on võimalik printida plastikust, mille sisse samaaegselt prinditakse süsinikust või basaldist tugevduskiud. Komposiitmaterjalid jäävad aga väljapoole käesoleva magistr töö skoopi.

#### **1.2.4. 3D-printimise võrdlus alternatiivsete tootmismeetoditega**

Võrreldes tavapärase tootmismeetoditega võimaldab 3D-printimine säästa rohkem materjali [36]. Kui tavaliselt toimub tootmine toorikust materjali eemaldamise teel, siis 3D-printimise puhul luuakse detail järkjärgult materjali lisamise abil. Seega on sama detaili tootmiseks vaja vähem materjali. 3D-printimise puhul on peamiseks materjalikaoks ebaõnnestunud prindid ja tugistruktuurid [74]. Materjali eemaldavate meetodite puhul tuleneb materjalikadu meetodi olemusest: detail toodetakse monoliitset tooraineplokist ja kao suurus sõltub eemaldatava materjali kogusest.

CNC-freesimine on peamine 3D-printimise alternatiiv. Alates 1940-ndatest on CNC-freesimine olnud kõige levinum prototüüpimise meetod [75]. CNC-freesimine on materjali eemaldav tootmismeetod, seega on materjalikadu suurem kui 3D-printimise puhul. Tooraine CNC-freesi jaoks on küll odavam kui 3D-printerite puhul, kuid CNC-freesi seadistamiseks on vaja oskustööjõudu, samuti võtab freesiseadistamine palju rohkem aega [75]. 3D-printeri G-kood on viilutamistarkvaraga hõlpsalt genereeritav; CNC-freesile G-koodi loomiseks on aga vaja eriteadmisi CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) tarkvarast, kus tuleb defineerida tööriistad, nende mõõtmed ja kiirused, samuti vajadusel tööriistavahetused, ning seadistada tööriistade liikumistrajektorid [76]. CNC-freesi suurim täpsus võib olla 0,0005—0,005 mm. Tavakasutajale mõeldud mudelid võimaldavad täpsust *ca* 0,01—0,03 mm, FDM meetodil 3D-printimine aga *ca* 0,1—0,5 mm [76]. CNC-freesimine võib olla kuluefektiivsem kui 3D-printimine, kui on vaja toota üle 20 ühesuguse detaili [75]. Kuigi väiksema täpsusega, on 3D-printimise abil võimalik toota keerukama geomeetriaga detaile kui CNC-freesiga. Näiteks on 3D-printer võimeline printima poorsed ja õõnsaid detaile, mida CNC-freesiga toota pole võimalik [77].

Levinud tootmismeetod on ka survevalu. Võrreldes survevaluga toodetud monoliitsete detailidega on 3D-prinditud detailid nõrgemad. Ahn *et al* avaldasid 2002. aastal artikli [78], milles võrdlesid ABS materjalist survevalu teel toodetud ja FDM meetodiga 3D-prinditud detailide vastupidavust. Nad leidsid, et 3D-prinditud detaili tugevus oli 65—72% survevaluga toodetud detaili tugevusest ning et erinevus tuleneb 3D-prinditud detailide anisotroopsetest omadustest. Seetõttu tuleb Ahn *et al* sõnul 3D-printimisel pöörata tähelepanu detaili printimise suunale ja võtta arvesse, mis suunas rakendub detaili kasutamisel suurim jõud. Franchetti ja Kress [79] analüüsisid ja võrdlesid survevalu ja 3D-printimise tasuvust ning leidsid, et üle 200 detaili tootmisel langeb survevalu hind detaili kohta piisavalt madalale, et eelistada survevalu, mis suurte partiide tootmisel tagab ka kiirema tootmise. Alla 200 detaili puhul on soodsam kasutada 3D-printimist. Survevalu kulukuse tingib Franchetti ja Kress'i sõnul peamiselt vormi kõrge hind (3 000—10 000 eurot). Disaini muutmisel on survevalu jaoks vaja toota uus vorm, 3D-printimisel aga selline lisakulu puudub. Detailide kogus, millest alates on survevalu 3D-printimisest soodsam, sõltub konkreetsest projektist ning väikeste detailide puhul võib ulatuda ka mitme tuhandeni [80]. Survevalu puhul detailide koguse suurenemisel ühe detaili hind langeb, 3D-printimisel ühe detaili hind kogusest ei sõltu.

Üks valdkond, kus 3D-printimine on eelistatud meetodiks, on robotika, sest detailid on tihti suhteliselt väikesed ja keeruka geomeetriaga, samuti on oluline disaini muudetavus ja detaili massi minimeerimine [80]. Järgnevalt on toodud näiteid 3D-printimise rakendamisest robotikas.

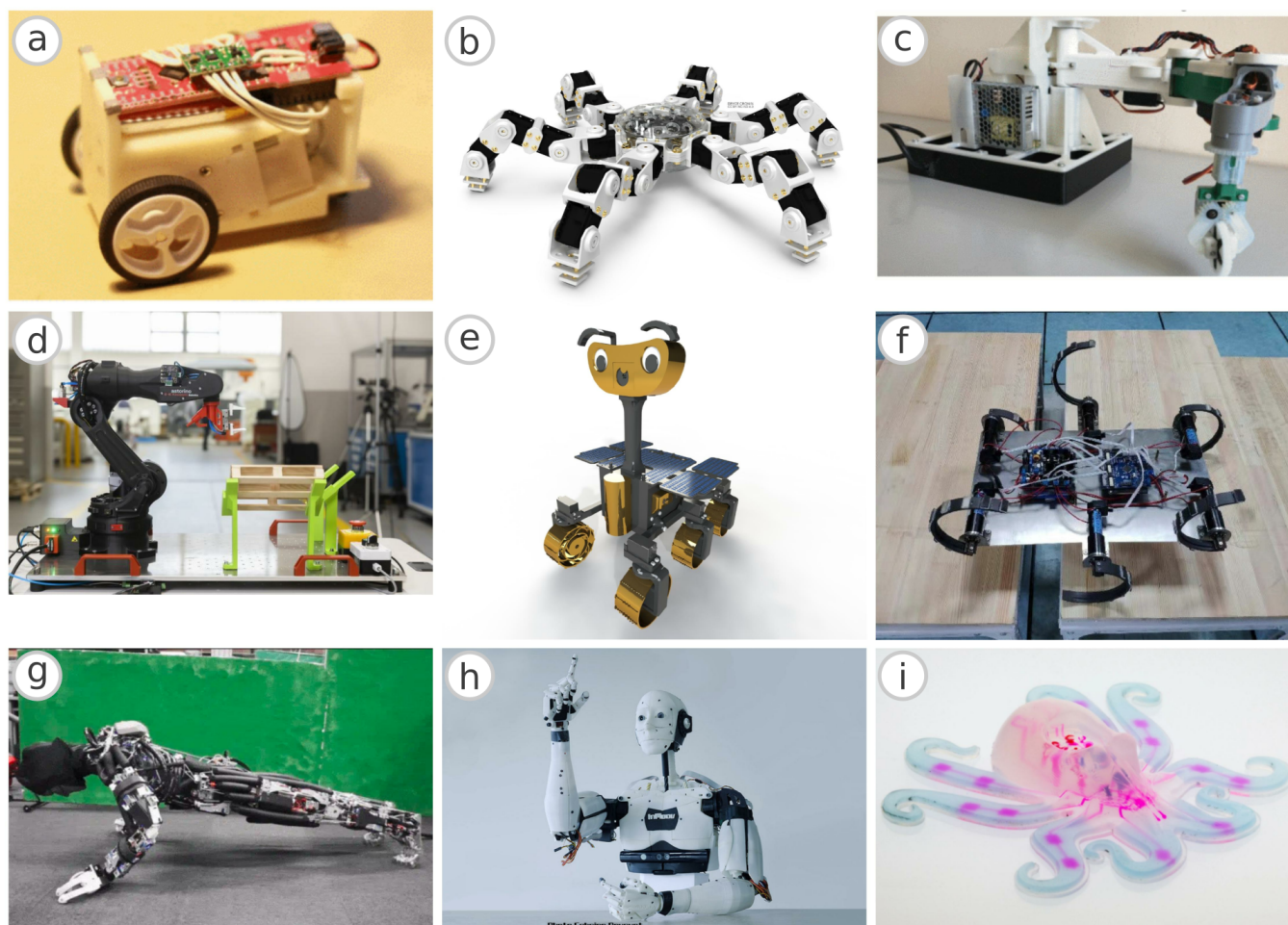
### **1.2.5. Rakendusnäiteid robotikast**

Osaliselt ja täielikult 3D-prinditud robotitest on kirjanduses arvukalt näiteid. Alljärgnevalt on toodud mõned näited, mis näitavad 3D-printimise rakendusvõimaluste laia ulatust.

Järjest paraneva kättesaadavuse tõttu on 3D-printimist kasutatud robotika ja tehnikahariduse populariseerimiseks. Näiteks Yorki Ülikoolis viidi 70 gümnaasiumiõpilasega läbi töötuba elektromehaanika ja arvutiteaduse tutvustamiseks, kus õpilased disainisid liikuvale 3D-prinditud käele sõrmed, mis kohapeal 3D-prinditi [81]. Töötoa läbiviijate sõnul võimaldas see lähenemine tutvustada õpilastele korraga nii 3D-printimist kiire prototüüpimise meetodina, robotikat kui ka inseneerias olulist ise loomise mõtteviisi.

Haridusrobotikas võimaldab 3D-printimine kiiresti luua ja edasi arendada erineva kerega roboteid, et neid kasutada õppe- ja teadustöös. Väike 3D-prinditava korpusega (8x5x6 cm) ja kruvivaba koostuga microMVP robot (Joonis 3a) on loodud nii ühe kui mitme robotiga raja- ja liikumise planeerimise algoritmide testimiseks [82]. Canberra Ülikoolis loodi alustava robotikaõppe jaoks kuue jalaga Anansi Hexapod robot (Joonis 3b), mille kõik keredetailid on 3D-prinditud [83]. Chavdarov *et al* [35] arendasid

nimeta 3D-prinditava manipulaatori (Joonis 3c), mille arenduses ja tootmises saavad tänu 3D-printimise kasutamisele osaleda ka õppurid. Manipulaatori lülide arv ja pikkus on hõlpsalt muudetavad ning detailide juurdevalmistamine on lihtne ja odav. Chavdarov *et al* disainis on roboti suuremad detailid prinditud PLA-st ja ABS-st FDM tehnoloogiaga ning peened detailid jäigast fotoaktiivsest polümeerist SLA 3D-printeriga. Tööstusrobotite tootja Kawasaki Robotics arendas 2022. aastal välja haridusliku Astorino roboti (Joonis 3d): suure Kawasaki roboti väikese süsinikfiibrist prinditud analoogi, mida on suure robotiga võrreldes odav toota ja parandada, kuid mille programmeerimine käib samamoodi nagu suurte robotite puhul, mis annab õppuritele päriselus kasutatavad oskused [84]. Euroopa Kosmoseagentuur arendas Rosalind Franklin marsikulgurist inspireeritud 3D-prinditud kulguri ExoMy (Joonis 3e), mille tark- ja riistvara on täielikult avalikud [85]. ExoMy kasutab ROS raamistikku ja on loodud õppuritele kosmoserobotika tutvustamiseks.



Joonis 3. Erinevad 3D-prinditud robotid: microMVP (a), Anansi Hexapod (b), Chavdarov *et al* manipulaator (c), Kawasaki Astorino (d), ExoMy kulgur (e), ratasjalgadega robot (f), Kengoro (g), InMoov humanoidi ülakeha (h), Octobot (i)

3D-printimist on rakendatud ka eksperimentaalse disainiga robotite ehitamiseks. Ni *et al* löid kuue

ratasjalaga roboti (Joonis 3f), mis kombineerib jalgadel kõndivate ja ratastel veerevate robotite omadusi [86]. Nad toovad mehaanilise disaini tugevusena välja, et kuna roboti jalad ja neid mootorite külge siduvad kinnitused on 3D-prinditud, on võimalik vajadusel detaile kiiresti juurde teha. Tokyo Ülikoolis loodud Kengoro humanoidi (Joonis 3g) osad keredetailid on valmistatud DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*) meetodiga, mis võimaldas roboti alumiiniumist detailid toota osaliselt poorsetena [87]. Neid poorseid kohti kasutatakse Kengoro puhul jahutuseks, mis roboti loojate sõnul toimib sarnaselt inimeste higistamisele. 2012. aastal loodud esimesest avatud lähtekoodiga 3D-prinditavast proteeskäest InMoov (Joonis 3h) on nüüdseks arendatud 3D-prinditud elusuuruses robot, mis on kodus prinditav 12x12x12 cm printimisalaga 3D-printeriga [88].

3D-printimisel on oma koht ka pehmerobotikas. Näiteks üleni pehmetest materjalidest tehtud Octoboti (Joonis 3i) valmistamisel kasutasid Wehner *et al* roboti pehme kere sisse kanalite loomiseks manusprintimist (ingl *embedded 3D printing* ehk EMB3D) [89]. Roboti kerematerjal valati vormi ja enne selle tahkumist prinditi kere sisse ulatuva peene nõelaga tindijooned, kust tint hiljem välja auras, jättes järele tühjad kanalid. Võimalus kiiresti printida erinevaid disaine kiirendas roboti arendusprotsessis sobiva arhitektuurini jõudmist — Wehner *et al* proovisid iteratiivselt 30 disaini ja valmistasid ligi 300 Octoboti.

Kuigi suure osa 3D-prinditud robotite puhul on 3D-printimise peamisteks eelisteks kiire prototüüpimine ja hõlbus detailide asendamine, on kirjanduses näiteid ka robotitest, mille arenduses on 3D-printimiseni jõutud alles mitmenda versiooni juures. Näiteks Boston Dynamicsi loodud ATLAS humanoidroboti konstruktsioonis asendati 2016. aastal roboti jalad metallist 3D-prinditud alternatiividega [90]. 3D-printimine võimaldas muuta roboti kergemaks ja vähendada kinnitusvahendite kogust, sest mootorid ja hüdraulika sai printimisel jalgadesse juba sisse ehitada. Samuti prinditi jalad osaliselt poorsetena, matkides inimese luude ehitust. Sellist arengut roboti disainis ja funktsionaalsuses võimaldas just 3D-printimine.

Järgnevas peatükis tutvustatakse Robotonti: robotit, millele käesoleva magistritöö raames arendatakse 3D-prinditav kere.

## 2. Robotont

See peatükk annab ülevaate robotplatvormist Robotont, mille 3. generatsiooni kere arendati käesoleva magistritöö raames. Lühidalt käsitletakse Robotondi ajalugu ja eelmise generatsiooni (gen 2) mudeli tootmislahendust. Andmaks paremat ülevaadet gen 3 projektist, kirjeldatakse põgusalt arendusi, mis ei ole käesoleva töö osaks, kuid mis seavad töö sisuks olevale kerearendusele teatud piirangud.

### 2.1. Ajalugu ja eesmärk

Robotont (Joonis 4) on Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudis loodud avatud tarkvaraga hariduslik robot, mis toetab ROS (*Robot Operating System*) [25] raamistiku kasutamist [3]. Robotont annab võimaluse ROS-i vahendite õpetamiseks füüsilise robotplatvormi peal nii ülikoolis kui gümnaasiumis.



Joonis 4. Robotondi evolutsioon. Vasakult paremale gen 1, gen 2, gen 2.1 [91]

Robotika õpetamisel kasutatakse sageli väikeseid haridusroboteid [92, 93, 94], mille eesmärgiks on enamasti õppurite algoritmilise mõtlemise arendamine. Neid roboteid on lihtne kasutada ja nende disainis on pööratud tähelepanu välisele atraktiivsusele. Rakenduslikus robotikas nagu tootmises, kaitsetööstuses ja keeruliste tingimustega keskkondade avastamisel on aga valdavalt kasutusel palju keerulisemad robotid, mille programmeerimine sarnaneb vähe haridusrobotite programmeerimisega. Robotont on sillaks nende kahe valdkonna vahel, sest on väike ja võrdlemisi odav, kuid pakub kõrget arvutuslikku jõudlust ja võimaldab õppida kasutama sama tarkvarasüsteemi, mis on kasutusel paljudes rakenduslikes robotites [95].

Robotont sai alguse 2016. aastal Robotexi võistlusrobotist, kui Raid Vellerind arendas oma bakalaureusetöö [96] raames sellele esmase ROS-i toe. Renno Raudmäe magistritöö raames arendati edasi Robotondi disaini ning toodeti kuus gen 1 ja 17 gen 2 robotit [97] (vt Joonis 4). Robotondi mehaanilise arendusega paralleelselt valmisid õppematerjalid Robotondi kasutamiseks Tartu Ülikooli

õppetöös Madis Kaspar Nigoli magistritöö raames [98]. Robotondi arengu jooksul on tehtud mitmeid bakalaureuse- ja magistritöid ning projekte, mille raames on robotile loodud veel õppematerjale ning kasutatud seda teadustöös [99, 100].

## **2.2. Gen 2 tootmislahendus**

Renno Raudmäe magistritöös [97] on kirjeldatud Robotont gen 2 tootmislahendus. Gen 2 kere on toodetud polükarbonaadist CNC-freesimise teel. Raudmäe toob aga välja, et freesimine on suhteliselt kulukas tootmismeetod, tehes keredetailide tootmise näiteks kaks korda kallimaks kui oleks laserlõikus. Samas võimaldab freesimine toota palju keerulisemad detaile kui laserlõikus, kuna erinevalt laserist võimaldab freesimine ka materjali paksuse töötlemist. Polükarbonaat ei ole laserlõigatav, sest polükarbonaadil on hea kuumustaluvus ning see neelab lõikelaseris kasutatavat infrapunakiirgust, mistõttu polükarbonaadi laseriga lõikamine on väga energiakulukas ja lõikamise tulemusel omandab algselt läbipaistev polükarbonaat määrdunud ja kõrbenud värvitooni [101]. Gen 2.1-s kasutatakse sama tootmislahendust nagu gen 2-s.

## **2.3. Seotud gen 3 arendused**

Robotont gen 3 arendus hõlmab endas paljude roboti alamosade muutmist. Käesoleva magistritöö sisuks oli gen 3 kere loomine, võttes aluseks gen 2.1 keredisaini ning arvestades teiste paralleelsete gen 3 arendustega. Paralleelselt olid teiste autorite arenduses uus elektroonikasüsteem ning toite- ja dokkimislahendus, mida on alljärgnevalt lühidalt kirjeldatud.

Robotont gen 2-1 oli eraldi juhtkontroller, kolm mootorikontrollerit ja toitelahenduse plaat, lisaks palju juhtmeid, mis trükkplaate omavahel ühendasid. Gen 2 kasutamise käigus ilmnis, et juhtmete ühendused põhjustavad sageli probleeme roboti kasutamisel. Seetõttu viiakse Robotont gen 3 elektroonika ühe suure trükkplaadi peale, et vähendada juhtmete ja ühenduste kogust roboti koostus ning tõsta töökindlust. Käesolevas magistritöös tuli elektroonikasüsteemi arendusega arvestada sel määral, et kere ja trükkplaadi kinnitused ühtiksid, kere pakuks trükkplaadile piisavat mehaanilist kaitset ning toetaks trükkplaadile planeeritavate komponentide sihipärast kasutamist.

Robotont gen 2 toiteallikaks oli 5200 mAh mahutavusega LiPo (liitiumpolümeer) aku [102]. Robotont gen 3 jaoks võetakse kasutusele Makita 5.0 Ah akumoodul [103], millel on sisseehitatud kaitseelektronika ja kasutamiseks valmis laadimislahendus. Toitesüsteemi arenduse käigus luuakse ka dokkimislahendus, mille eesmärk on võimaldada aku laadimist ilma seda robotist eemaldamata. Käesolevas magistritöös tuli arvestada toitelahenduse arendustega sellisel, et keres oleks sobivad avad aku ja selle kinnitusdetailide jaoks ning et kere ühtiks loodava dokkimislahendusega.

## 3. Töö eesmärgid ja nõuded

Käesolevas peatükis sõnastatakse käesoleva magistritöö eesmärgid ja tuuakse välja töö tulemusele seatud nõuded.

### 3.1. Eesmärgid

Töö põhieesmärgid olid 3D-prinditava Robotondi disainimine ja loodud disaini printimiseks optimaalse 3D-printeri seadistuse väljatöötamine. Järgnevates alampeatükkides tutvustatakse eesmärke lähemalt.

#### 3.1.1. Robotondi kere 3D-prinditava disaini loomine

Töö esimene eesmärk on disainida Robotondile 3D-prinditav kere. Kere tootmismeetodiks valiti 3D-printimine, et muuta Robotont haridusrobotina laiemalt kättesaadavaks ja hõlbustada roboti kasutajatel sellele uue funktsionaalsuse lisamist.

Kere disain hõlmab endas CAD mudelite loomist ja optimeerimist. Disaini ja printimise tsüklite käigus optimeeritakse iteratiivselt keredetailide kuju. Ühelt poolt tuleb teha muudatusi gen 2.1 disainis lähtuvalt 3D-printimise kui tootmismeetodi vajadustest, teisalt annab roboti ümberdisainimine võimaluse optimeerida selle mehaanilisi omadusi.

Töö tulemusel luuakse Robotont gen 3 kere CAD mudelid, mis on aluseks detailide 3D-printimisele. Lisaks valmib üks näide kere modifikatsioonist, mille kaudu lisatakse Robotondile täiendavat funktsionaalsust. Disain tehakse avalikult kättesaadavaks, et võimaldada kere vaba edasiarendamist.

#### 3.1.2. Kere 3D-printimiseks sobiva seadistuse väljatöötamine

Töö teine eesmärk on gen 3 kere 3D-printimise protsessi loomine. Kuna 3D-printimisel mõjutab printeri seadistus ja parameetrite valik tugevalt tulemuse kvaliteeti, on oluline pakkuda valmis konfiguratsiooni- ja koodifaile, mille abil saab kasutaja soovi korral printida täpselt sellised detailid nagu käesolevas magistritöös. Töö tulemusel valmivad failid, mille järgi on võimalik gen 3 kere ühe 3D-printeri mudeliga välja printida ilma ühtegi kasutajapoolset muudatust tegemata. Selliste failide avalikult kättesaadavaks tegemine toetab eelkõige kasutajaid, kes ei soovi või ei oska ise valida alternatiivset 3D-printeri seadistust. Samuti on see oluline tulemuse korratavuse tagamiseks.

Töö käigus viiakse läbi analüüs optimaalsete printerisätete leidmiseks. Empiiriliste katsete abil veendutakse loodud disaini vastupidavuses ja optimeeritakse 3D-printeri sätteid vajaliku tugevuse saavutamiseks. Töö käigus välja töötatud G-kood ja viilutamistarkvara projektifailid tehakse avalikult kättesaadavaks.

## 3.2. Nõuded

Robotondi 3D-prinditavale kerele seati järgnevad tingimused ja piirangud:

1. Robotondi visuaalne identiteet peab säilima. See tähendab, et gen 2-s kasutatud üldkuju ja gabariitmõõdud peavad jääma muutumatuks. Visuaalselt peab olema äratuntav, et gen 2 ja gen 3 on sama roboti erinevad generatsioonid. See on oluline näiteks kasutajakogemuse ühtlustamiseks eri generatsioonide Robotontide kasutamisel, samuti selleks, et simulatsioonikeskkonnas kasutatav mudel ei peaks sõltuma kasutajale kättesaadava füüsilise Robotondi generatsioonist.
2. Kere peab sobituma gen 3 uue elektroonikalahenduse ning toite- ja dokkimislahendusega.
3. Keredetailid peavad olema prinditavad kodukasutaja 3D-printeriga. Kodukasutaja 3D-printeri näitena kasutati selle kättesaadavuse tõttu Prusa i3 MK3S+ 3D-printerit, mille printimisala suuruseks on 250x210x210 mm [104].
4. Detailid peavad olema prinditavad ilma tugistruktuurideta, et vältida printimisjärgse puhastamise vajadust ja materjali raiskamist.
5. Lisaseadmete kandevõimekuse tagamiseks ei tohi keres esineda märgatavat plastset deformatsiooni, kui lühiajaliselt (kuni 1 h) asetatakse kuni 10 kg massiga lisaseade selleks mõeldud kandedetailile.
6. Kere peab olema piisavalt löögikindel, et see tavalise kasutamise käigus kokkupõrke toimumisel ei deformeeru. Deformeerumise all peetakse silmas struktuurselt olulisi kahjustusi nagu murdumine või pragunemine, mitte vähetähtsaid kriimustusi.

Töö eesmärkide saavutamisel arvestati kirjeldatud nõuetega. Järgnevalt on kirjeldatud meetodikat, mille abil eesmärkide täitmiseni jõuti.

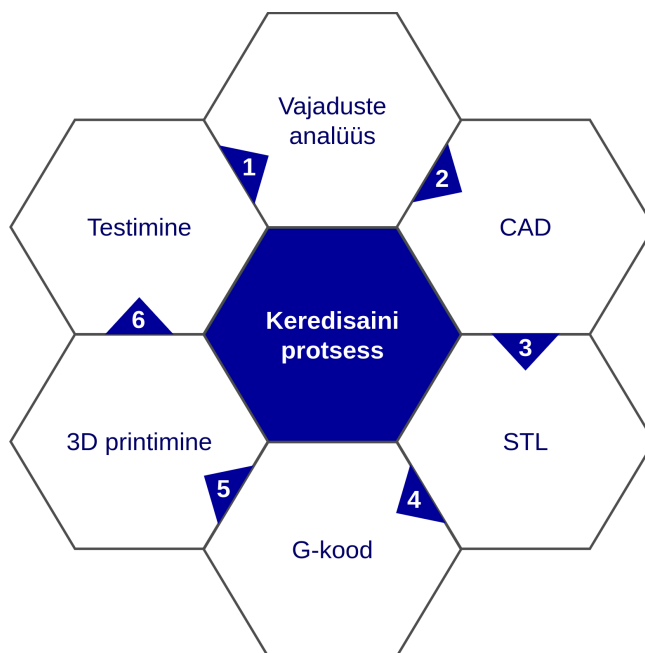
## 4. Metoodika

See peatükk annab ülevaate, millist metoodikat käesolevas magistritöös kasutati, et eelmises peatükis kirjeldatud eesmärgid nõuete ja piirangutega arvestades täita. Esmalt kirjeldatakse keredisaini protsessi. Seejärel antakse ülevaade 3D-printeri sätete optimeerimiseks ja tulemuse töökindluses veendumiseks kavandatud katsete metoodikast. Viimaks kirjeldatakse keredisaini etappide ja vahetulemuste haldamiseks kasutatud versioonihalduse põhimõtteid.

### 4.1. Disainiprotsess

Robotont gen 3 kere disainiti SolidWorks 2021 Student Edition [11] CAD tarkvaraga. 3D-printimiseks salvestati loodud mudelid STL-failidena, mille põhjal loodi PrusaSlicer 2.3.1 [105] viilutamistarkvara abil G-kood, mis kirjeldas kogu printi seadistuse, sealhulgas printipea ja -aluse liikumise ning filamendi lisamise. Seejärel printiti detailid FDM meetodil Prusa i3 MK3S+ [104] 3D-printeriga, mis pakub optimaalset tasakaalu kvaliteedi, võimekuse ja hinna vahel ning on välja toodud kui parim keskmise suurusega kodukasutaja 3D-printer [106]. 3D printeri sätete alguspunktiks võeti PrusaSliceri vaikeprofiil "0.20mm QUALITY @MK3", kus kihi paksus on 0,2 mm ja seadistus on suunatud pigem parema printikvaliteedi kui -kiiruse saavutamisele. Neid seadeid kohandati töö käigus jooksvalt.

Keredetaile arendati nelja moodulina: raami-, mootori-, kaamera- ja arvutimoodul, mis kõik koosnevad mitmest detailist. Igast gen 2.1 detailist tehti esmalt SolidWorks mudel. Seejärel rakendati iteratiivset disainiprotsessi, mis on inspireeritud välearendusest. Disainiprotsessi struktuuri illustreerib [Joonis 5](#).



Joonis 5. Keredisainis rakendatud iteratiivse disainiprotsessi sammud

Iga detaili jaoks läbiti kirjeldatud protsessi korduvalt, eesmärgiga jõuda iga arendustsükliga lähemale optimaalsele 3D-prinditavale disainile. Protsess algas vajaduste ja puuduste analüüsiga, mille tulemuste põhjal tehti seejärel CAD mudelis muudatused. Detaili CAD mudel teisendati STL failiks, mille põhjal genereeriti G-kood. G-koodi järgi printiti detail 3D-printeriga. Seejärel testiti printitud detaili sobivust teiste detailidega ning printimise kvaliteeti. Testimise tulemuste põhjal formuleeriti uued arenduseesmärgid ning protsess kordus.

Kõik raami-, kaamera- ja arvutimooduli detailid printiti PLA-st. Mootorimooduli detaile printiti nii PLA-st kui PETG-st.

## 4.2. Tugevusanalüüs

Disainitud kere kvaliteedi hindamiseks viidi läbi jäikuse- ja löögikindluse analüüs. Käesolevas peatükis on kirjeldatud katsete üldine kulg. Detailsem kirjeldus koos piltidega asub tulemuste analüüsi juures.

Jäikuse analüüs on vajalik selleks, et veenduda kere vastupidavuses sellele asetatud lisaseadmete massile. Roboti kasutamise käigus on vaja kinnitada roboti külge lisaseadmeid, samuti võib olla vaja robotiga esemeid transportida. Kere jäikuse mõõdupuuks loeti märgatava plastse deformatsiooni puudumist roboti lühiajalisel koormamisel.

Löögikindluse analüüs on vajalik, et veenduda kere vastupidavuses ootamatutele kokkupõrgetele. Robotont on mobiilne ratasplatvorm, mida kasutatakse õppetöös, seega tuleb arvestada võimalike kokkupõrgetega ümbritseva keskkonnaga.

### 4.2.1. Jäikuse analüüs

Kere jäikuse hindamine viidi läbi kahes etapis: üksiku detaili analüüs ja terve kere analüüs.

Esmalt viidi läbi 3 punkti paindekatsede ühe keredetaili näidistega, mis printiti erinevate perimeetrite arvu ja sisetäite protsendi kombinatsioonidega. Katsete eesmärk oli leida jõu-deformatsiooni seosed, et valida keredetailide printimiseks optimaalsed parameetrid, mis tagaksid kere vajaliku jäikuse, kasutades minimaalselt materjali ja printimisaega. Detailide jäikust mõõdeti AEL-A-1000 [107] tõmbe- ja survetugevuse mõõtmise seadmega, millega saab 0,1 N sammuga ja mõõtetäpsusega  $\pm 1\%$  mõõta jõudusid kuni 1000 N.

Mõõtmiseks ehitati puidust ja alumiiniumist rakis, mis toestas detaile kahest punktist, millevaheline kaugus oli 15 cm. Seejärel rakendati mõõteseadmega ümara alumiiniumprofili toimel ülalt jõudu detaili keskeljele kuni detaili murdumiseni. Testdetailidele oli eelnevalt hoitud sarnastel tingimustel sarnase aja jooksul, kuid tingimuste ideaalset samasust ei olnud võimalik tagada. Katse viidi läbi toatemperatuuril.

Mõõtmiste tulemusel leiti eri konfiguratsiooniga printitud detailide jõu-deformatsiooni kõverad ja määrati elastse deformatsiooni piirkonnad.

Kere jäikuse analüüsi teises etapis prinditi välja kogu kere, kasutades printimisel perimeetrite arvu ja sisetäite protsendi kombinatsiooni, mis esimese etapi tulemuste põhjal andis kõige optimaalsema tulemuse. Terve kere puhul uuriti kere läbipainet 0,5—10 kg suuruse koormuse mõjul ja painde püsivust.

Kere läbipainde hindamiseks paigutati kere võrdse kõrgusega alumiiniumist tugeledele. Kere alla paigutati Keyence LK-G82 mõõtelaser [108], mille korratavus on 0,2 µm. Kere peale lisati ca 0,5 kg suuruse sammuga kaaluvihete kogumassiga 0,5—10 kg ja mõõdeti laseriga kere painde suurust.

Viimaks hinnati painde püsivust, mille mõõtmiseks koormati alumiiniumist tugeledele paigutatud keret 10 kg suuruse massiga 4-minutilise ja 2-tunnise perioodiga tsüklitena. Igast mõõtetsetüklist poole vältel oli kere koormatud ja poole ilma koormuseta. Kogu katse jooksul mõõdeti laseriga kere painde suurust. Laseri automatiseeritud andmehõiveks kirjutati masinnägemisel põhinev Pythoni skript, millega salvestati laseri lugemit kogu mõõteaja jooksul sagedusega 1 Hz (vt Lisa 1).

#### 4.2.2. Löögikindluse analüüs

Kere löögikindluse hindamiseks simuleeriti selle kokkupõrkeid vertikaalpinnaga. Elektroonikata gen 3 kere kinnitati nööri abil gen 2 külge selliselt, et nöör läbis kahe roboti vahelist vertikaalset takistust. Vedava robotiga sõites tabas testitav kere takistusi analoogselt ise kokkupõrke põhjustamisele. Katset ei olnud võimalik läbi viia gen 3-ga sõitmise teel, sest selleks vajalik elektroonika, mille valmimine ei ole seotud käesoleva magistritööga, ei olnud katsete läbiviimise hetkel veel kättesaadav. Kokkupõrkeid sooritati kiirustel 0,1 m/s, 0,25 m/s, 0,33 m/s ja 0,5 m/s, iga kiirusega viis korda.

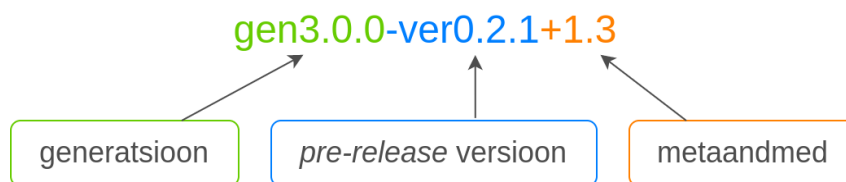
### 4.3. Versioneerimine

Käesolevas magistritöös võeti printitud keredetailide versioonide süstematiseerimiseks kasutusele semantilise versioneerimise [13] (SemVer, ingl *Semantic Versioning*) sarnane süsteem. SemVer loodi küll tarkvara sõltuvuste haldamiseks ja ühtse süsteemi loomiseks, kuid selles kasutatavad põhitõed on rakendatavad ka teistsugustes projektides [109, 110].

Töö alguses kasutati ainult detailipõhist versioneerimist. Detailide sisse prinditi versiooninumber kujul v1.X, kus X tähistas konkreetse detaili iga järgmist printi, kus eelmise printiga võrreldes oli midagi muudetud. Keredisaini protsessi (Joonis 5) käigus ilmnes, et kuna detailide arendus toimus erinevas tempos, ei andnud selline versioneerimine piisavalt selget ülevaadet sellest, millised detailid on mõeldud üksteisega koos kasutamiseks. Seetõttu oleks selline süsteem võinud viia probleemideni, mida tarkvaraarenduses tuntakse ingliskeelse termini "*dependency hell*" [13] all.

Kuigi see ei olnud käesoleva töö esialgsete eesmärkide hulgas, võeti probleemi lahendamiseks kasutusele SemVer-põhine versioonide numeratsioon. Järgnev lõik põhineb SemVer ametlikul dokumentatsioonil [13] ja kasutab eestikeelset terminoloogiat riigi infosüsteemi haldussüsteemi (RIHA) semantilise versioneerimise juhendist [111]. SemVer süsteemis tähistatakse versioone kujul *major.minor.patch*, kus suurversioon (*major*) muutub suurte, varasemaga mitte kokkusobivate muudatuste tegemisel, väikeversioon (*minor*) muutub varasemaga kokkusobiva funktsionaalsuse lisamisel ja paik (*patch*) muutub varasemaga kokkusobivate veaparanduste tegemisel. Esmase arenduse ja kiire prototüüpimise jaoks kasutatakse versiooni 0.y.x, mis ei pea veel olema avalikult kättesaadav ega stabiilne, kõik arendatava projekti komponendid võivad igal hetkel muutuda ning nende omavaheline sobivus pole igal ajahetkel tagatud. Esimene avalikult kättesaadavaks tehtav stabiilne versioon tähistatakse numbriga 1.0.0 ning edasised uuendused baseeruvad sellel versioonil.

Enne käesolevat magistritööd piirdus Robotondi versioonide numeratsioon generatsiooninumbriga *major.minor* tasemel, kuid ühtlustamata kujul (gen 2, gen 2.1). Täpsema eristusega numeratsiooni ei kasutatud. Ühildamaks SemVer süsteemi Robotondi puhul seni kasutusel olnud väiksema täpsusega generatsiooninumbrite süsteemiga selliselt, et seda saaks ka hiljem Robotondi laiemas arenduses edasi kasutada, töötas käesoleva töö autor SemVer põhimõtetele ja juhendajatelt saadud tagasisidele toetudes välja versioonide tähistamise süsteemi, mida kirjeldab Joonis 6. Üldisel tasandil jaotuvad versioonitähised kolmeks osaks: generatsiooninumber, väljalaske-eelne ehk *pre-release* number, ja metaandmed. Järgides SemVer reegleid on generatsiooninumbrit sidekriipsuga eraldatud *pre-release* tähis, mille järele on plussmärgiga lisatud metaandmed. *Pre-release* numbri olemasolu näitab, et sellest kõrgema tasandi versioon (tähistatud generatsiooninumbriaga) on see, mille jaoks toimub arendus.

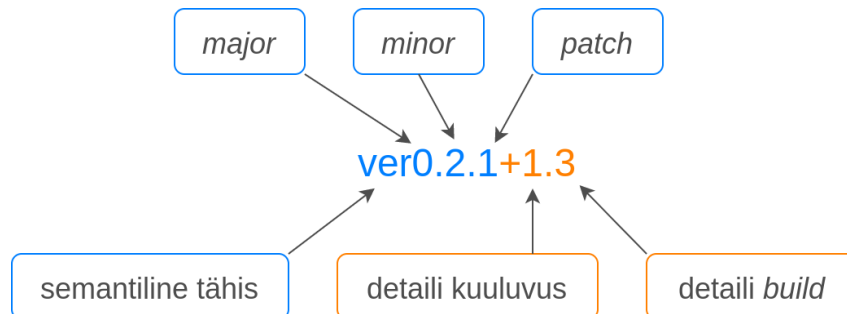


Joonis 6. Kasutatud versiooninumbrite üldine kuju. Rohelisega on tähistatud generatsiooninumber, sinisega *pre-release* versiooninumber ja oranžiga metaandmed.

Käesoleva töö tulemusel valmib stabiilne Robotont gen3.0.0 kere. Töö käigus toimuvate arenduste üle järje pidamiseks on kasutusel *pre-release* numeratsioon, mis jälgib sarnaselt generatsiooninumbriaga *major.minor.patch* süntaksit. Kui pole eraldi märgitud generatsiooninumbrit, viitavad kõik edaspidi toodud versiooninumbriid tulevasele gen3.0.0-le.

*Pre-release* ja metaandmete välju versiooninumbri kirjeldab lähemalt Joonis 7. Tähistes on numbri ees kasutusel *ver* (versioon), et oleks visuaalselt selge, et tegemist on versiooninumbriaga. Samuti eristab

ver eesliide versiooninumbreid töö alguses kasutatud `v1.X` süntaksist. Joonisel on sinisega näidatud kere versiooninumber (*pre-release*) ja oranžiga detaili versiooninumber (metaandmed). Detaili versiooninumber baseerub algselt kasutatud `v1.X` süsteemil, et tagada versioneerimissüsteemide omavaheline seotus, v tähis SemVer-põhise süsteemi rakendamisel aga eemaldati.



Joonis 7. Kasutatud versiooninumbrite tähistuse selgitus. Sinisega on näidatud kere versiooninumber (*gen3.0.0* suhtes *pre-release*), oranžiga detaili versiooninumber (metaandmed).

Lähtudes SemVer tavadest on kogu käesoleva magistr töö raames tehtud arenduse *major* number 0, sest tegemist on esmase arendusega. Järgmine, *minor* number tähistab terve kere versiooni. See number muutub siis, kui on tehtud suurem arendus ehk enamikus keremoodulites midagi muudetud ning seejärel terve uue roboti jagu detaile välja prinditud. Kolmas, *patch* number muutub juhul, kui muudatus toimub ainult mõnes detailis või moodulis ning uued detailid prinditakse välja ilma teiste moodulite arendust järgi ootamata. Versiooninumber muutub ainult printides ning koondab kõiki kahe prindi vahelisel ajal CAD mudelis tehtud muudatusi.

*Pre-release* numbrist on plussmärgiga eraldatud metaandmed, mis näitavad detaili versiooninumbrit, mis koosneb detaili kuuluvuse tähistest ja detaili *build* numbrist. Detaili kuuluvuse number 1 tähistab, et tegemist on baasmudeli detailiga. Numbrid  $\geq 2$  näitavad, et konkreetne detail on mõeldud mõne spetsiifilist funktsionaalsust lisava erimudeli jaoks, mis täiendab baasarenduse detaile mõne haridusliku ülesande tegemise võimaldamiseks või konkreetsete õpiväljundite omandamiseks. Detaili *build* number näitab, mitmenda versiooniga konkreetse detaili puhul tegemist on. Kuna kasutatakse 0-põhist indekseerimist, tähistab näiteks 1.4 baasmudeli detaili viiendat versiooni, 2.0 aga esimese erimudeli detaili esimest versiooni. Detaili versiooninumbrit 0.0 kasutatakse selleks, et viidata *gen 2.1* detailidele, kuhu ei ole veel tehtud muudatusi, kuid mida käsitletakse printimise kontekstis. `Ver0.0.0` tähistab esmast keret, mida täies mahus ei prinditud, kuid mille arenduse jooksul toimunud etappe on oluline kirjeldada.

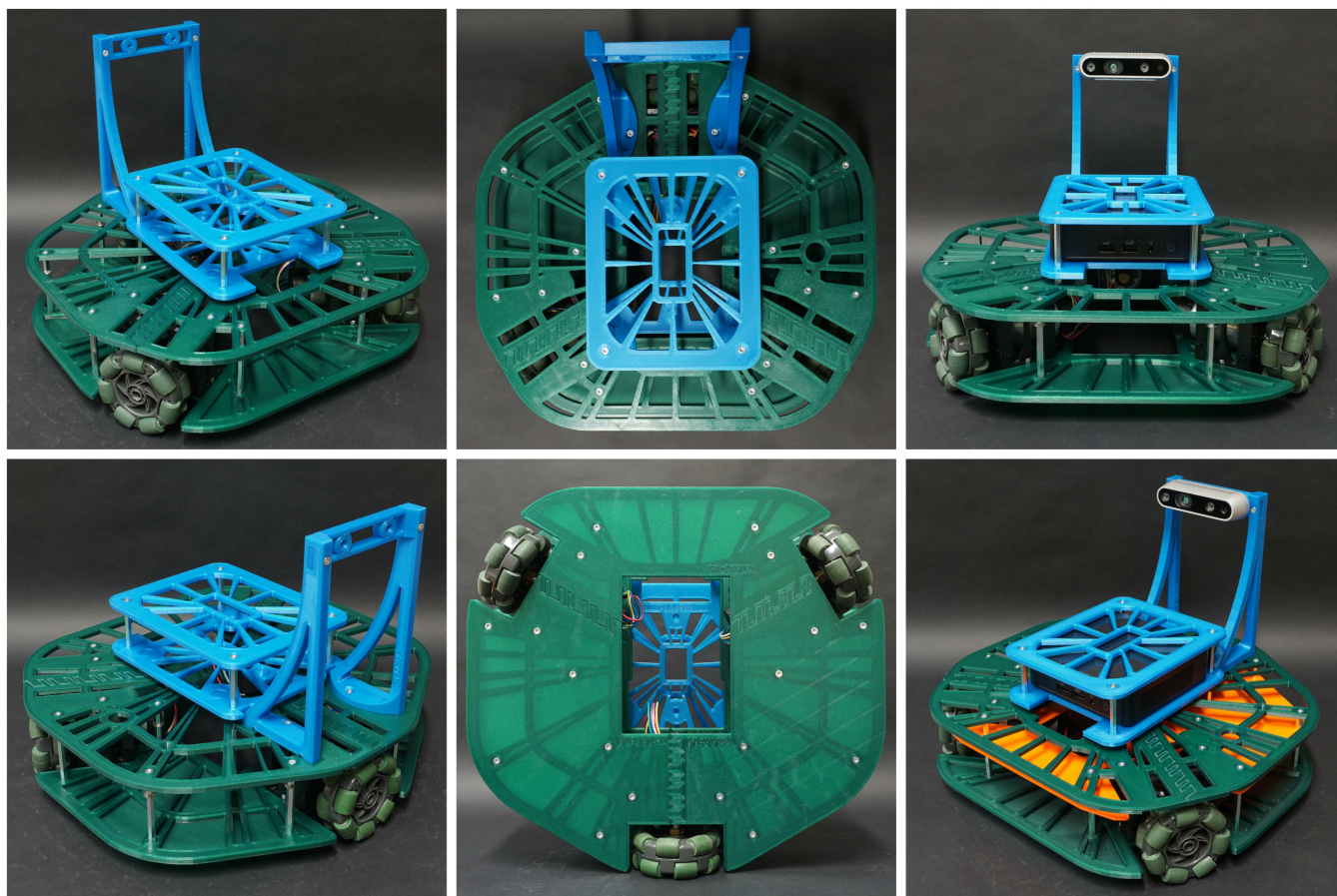
Järgnevalt on põhjalikult kirjeldatud magistr töö tulemusi, milleni käesolevas peatükis toodud meetodika rakendamisel jõuti.

## 5. Robotont gen 3 keredisain ja analüüs

Käesolevas peatükis kirjeldatakse töö põhisisu. Esmalt antakse üldine ülevaade töö käigus arendatud 3D-prinditavast Robotondi kerest ja kirjeldatakse arenduse olulisemaid osi keremoodulite kaupa. Seejärel antakse detailne ülevaade optimaalsete printerisätete leidmiseks ning tulemuse kvaliteedis veendumiseks läbiviidud katsete käigust ja tulemustest. Seejärel kirjeldatakse kere printimise ja koostamise protsessi ning viimaks tuuakse konkreetne näide ilmestamaks 3D-prinditava disaini muutmise lihtsust.

### 5.1. Ülevaade

Gen 3 kere disainiti nelja moodulina: raami-, mootori-, kaamera- ja arvutimoodul. Protsessi käigus rakendati iteratiivse disaini põhimõtteid, arendades paralleelselt erinevaid mooduleid, siludes printimisel ilmnenud probleeme ja printides uuesti. Selle lähenemise eesmärk oli saavutada iga mooduli sobiv disain, samuti moodulite omavaheline kokkusobivus nii visuaalselt kui ka mehaaniliste istude poolest. Töö käigus valminud Robotont gen3.0.0-ver1.0.0 3D-prinditud keret kujutab Joonis 8.



Joonis 8. Robotont gen3.0.0-ver1.0.0 3D-prinditud kere eri vaadetest. Paremal üleval on kere koos sügavuskaamera ja pardaarvutiga, paremal all simuleerib oranž detail lisaks PCB kaju ja suurust.

Joonis 8 näidatud kere oli kolmas kere, mis arenduse käigus täies mahus uutest detailidest toodeti ja kokku pandi. Vahepealsetes versioonides vahetati detaile välja väiksemas koguses. Varasemaid keresid, mis koostati samuti täies mahus uutest detailidest — ver0.1.0 ja ver0.2.0 — kujutab Joonis 9.



Joonis 9. Ver0.1.0 ja ver0.2.0. Oranž detail vasakpoolsel pildil simuleerib PCB kuju ja suurust. Paremal tähistatud moodulid: raamimoodul (a), mootorimoodulid (b), kaameramoodul (c) ja arvutimoodul (d).

Ver0.1.0 oli esimene täiskomplektne versioon kerest, mille kokkupanemisel leiti palju puudusi, mis üksikute moodulite printimisel ja testimisel ei olnud ilmnenud. Edasises arenduses lähtuti nii iga detaili individuaalsest parendamisest kui ka kogu koostu paremast kokkusobivusest. Ver0.2.0 koosnes täiemahuliselt uutest detailidest, millest osa oli ver0.1.0 ja ver0.2.0 vahel läbinud mitu iteratsiooni. Semantilise versioonihalduse tavadest lähtuvalt sai käesoleva töö tulemusel valminud viimane kere versiooninumbriks ver1.0.0, mille printimiseks vajalikud lähte- ja tootmisfailid tehti avalikult kättesaadavaks (vt Lisa 2). Varastes versioonides toimunud muudatused olid suured ning igas järgmises versioonis liikus arendus järjest peenemate nüanssideni.

Järgnevalt on kirjeldatud kere arendust moodulite kaupa, tuues välja olulised osad disainist.

## 5.2. Raamimooduli arendus

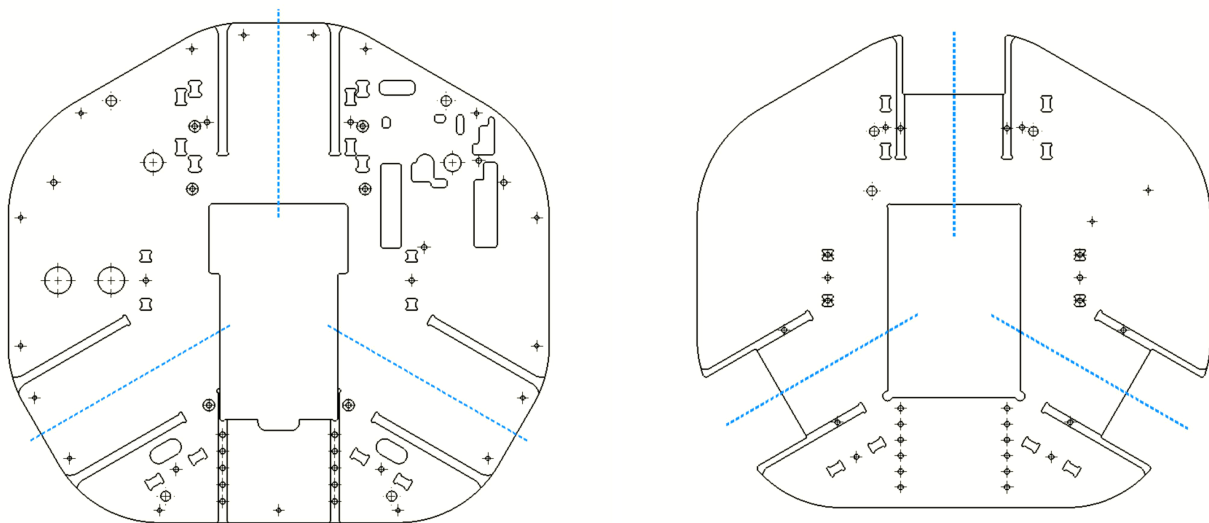
Robotondi kõige suurem moodul on raamimoodul, mis koosneb kahest paralleelsest plaadist: alumine ja ülemine. Raamimooduli külge kinnituvad kõik teised moodulid, samuti on raamimoodul üldjuhul see, millele kokkupõrke korral rakendub suurim jõud. Seetõttu peab raamimoodul olema mehaaniliselt tugev. Olles Robotondi suurim moodul, on raamimoodul kõige nähtavam osa robotist, mistõttu on olulised ka

selle visuaalsed omadused. Järgnevalt on kirjeldatud raamimooduli arenduse eri etappe ja lahendusi.

### 5.2.1. Detailide printimisalale mahutamine

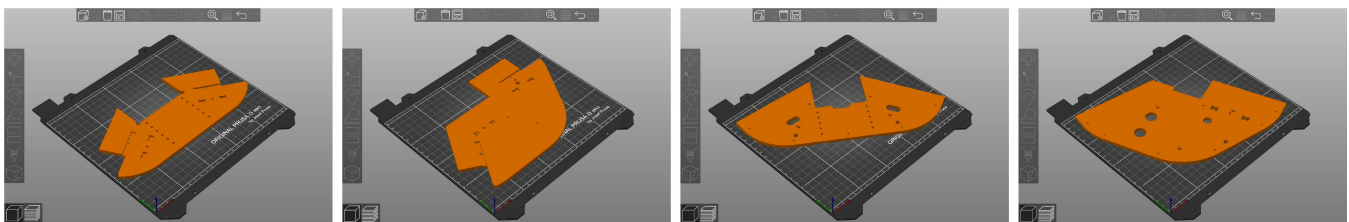
Lähtudes töö peamisest eesmärgist — muuta Robotondi kere 3D-prinditavaks — ilmnis esimese probleemina, et gen 2.1 raamimooduli detailid ei mahu füüsiliselt Prusa printerisse, mille printimisala mõõtmed on 250x210 mm [104]. Robotondi alumise ja ülemise plaadi mõõtmed on 326x300 mm.

Selleks, et plaadid printerisse mahuksid, oli vaja need teha mitmeks tükiks. [Joonis 10](#) näitab ühte võimalikku viisi plaatide tükeldamiseks, mida ka edasises arenduses rakendati. Kuna iga liitekoht potentsiaalselt nõrgendab detaili, valiti liitekohad selliselt, et neile võimalikult lähedal paikneksid juba olemasolevad kahte plaati siduvad struktuurielemendid. Liitekohad on paigutatud rattamoodulite alla ja kohale, sest rattamoodulite küljed annavad kerele vajaliku jäikuse ka liitekohtade olemasolu korral.



*Joonis 10. Raamimooduli alumise (vasakul) ja ülemise (paremal) plaadi (ver0.0.0+0.0) joonised. Sinised katkendlikud jooned tähistavad planeeritud lõigete asukohti.*

Sellise lõigete paigutuse korral mahuvad tükid ka 3D-printerisse, nagu illustreerib [Joonis 11](#).



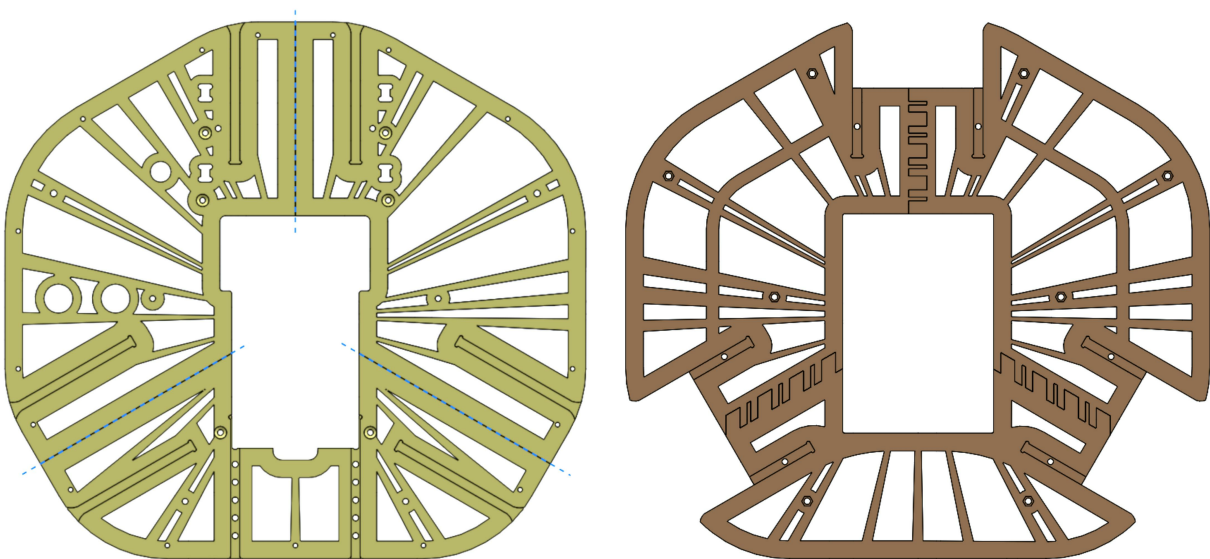
*Joonis 11. Raamimooduli detailid tükeldatuna PrusaSlicer tarkvaras, detailid mahuvad printimisalale. Joonistel vasakult paremale: alumise plaadi esitükk (ver0.0.0+1.0) ja vasak küljetükk (ver0.0.0+1.0), ülemise plaadi esitükk (ver0.0.0+1.0) ja vasak küljetükk (ver0.0.0+1.0).*

Siiski ei ole nende detailide 3D-printimine otstarbekas, kuna need sisaldavad palju liigset materjali. Järgmises alampeatükis on selgitatud, kuidas see arendusetapp lahendati.

### 5.2.2. Detailide materjalikulukus

Alumise ja ülemise plaadi printimine kolme tükina ilma täiendavate muudatusteta oleks aja- ja materjalikulukas. Printimisaja ja materjalikulu vähendamiseks tehti plaatidesse augud kõigisse kohtadesse, kus materjali olemasolu pole funktsionaalselt vajalik. See võib vähendada ka detaili printimisel deformeerumise tõenäosust, sest erinevates printimise juhendites on suurte siledade pindade printimise miinusena välja toodud suurt deformeerumisohtu [112, 113].

Materjali eemaldati detailidest järgmise loogika alusel. Kõigi funktsionaalsete avade jaoks jäeti avade ümber alles 5 mm materjali ja servadesse 10 mm. Seejärel tõmmati plaadi keskpunktist puutujad nende laiendatud alade servadega. Puutujate vahele jäävatest aladest eemaldati materjal, nagu näitab [Joonis 12](#). Protsessi käigus minimeeriti vajalike funktsionaalsete avade kogust, eemaldades avad, mis gen 2.1-s olid vajalikud, kuid 3D-printitavas disainis enam mitte. Gen 2.1-s olulised konnektorite avad asendati enamikus materjalisäästuavadega, mis lisaks roboti massi vähendamisele hõlbustavad oluliselt ligipääsu roboti sisemistele komponentidele. Kuna gen 3-s on kogu elektroonika ja kõik pistikud ühe suure trükkplaadi peal, on oluline tagada neile piisav ligipääs. Roboti keskpunktis koonduvate kiirte disain täidab kahte eesmärki. Esiteks annab see robotile läbiva stiili, sest sama põhimõttega disaini kasutati ka teistes moodulites. Teiseks tagavad kiired, et roboti ükskõik millisest külgsuunast kokkupõrke toimumisel on mõni kiir kas täpselt või peaaegu paralleelne kokkupõrke suunaga. See annab robotile struktuurse tugevuse.



*Joonis 12. Ülemise plaadi (ver0.0.0+1.0) ja alumise plaadi (ver0.1.0+1.1) detailid peale materjalikulu vähendamist. Ülemise plaadi detailides on veel näha mõned gen 2.1 augud, mis hiljem eemaldati.*

Ülemise plaadi detailide printimiseks kuluvat aega ja filamendikulu näitab Tabel 3. Printimisaegade hindamiseks kasutati PrusaSlicer tarkvara vaikeseadeid mallist "0.20mm QUALITY @MK3". Tabel on toodud võrdlemaks, kui palju mõjutas avade lisamine printimise aja- ja materjalikulu ja ei kajasta detailide lõplikke printimisaegu ja materjalikulu.

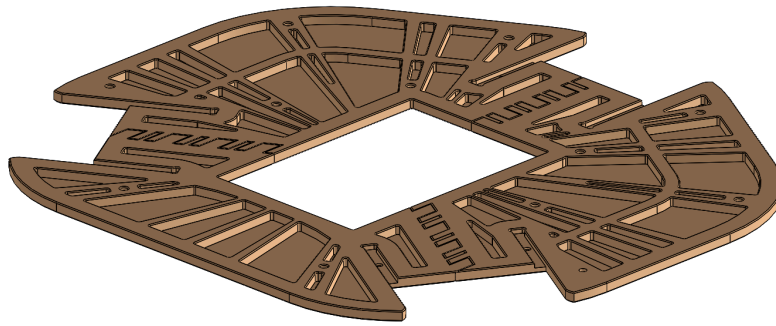
Tabel 3. Ülemise plaadi kolme jupina printimise aja- ja filamendikulu enne (ver0.0.0+1.0) ja pärast (ver0.0.0+1.0) materjalisäästuavade lisamist

Detail	Printimisaeg			Filamendikulu (g)		
	Enne	Pärast	Muutus	Enne	Pärast	Muutus
Eesmine	4 h 22 min	4 h 21 min	-1 min	63	52	-11
Tagumine vasakpoolne	5 h 20 min	4 h 54 min	-26 min	81	57	-24
Tagumine parempoolne	5 h 23 min	4 h 38 min	-45 min	77	54	-23
<b>Kokku</b>	<b>15 h 05 min</b>	<b>13 h 53 min</b>	<b>-1 h 12 min</b>	<b>221</b>	<b>163</b>	<b>-58</b>

Materjalisäästuavade lisamise tulemusel vähenes ülemise plaadi printimiseks kuluv aeg 72 minuti (8%) ja materjalikulu 58 g (26%) võrra (vt Tabel 3). Ajakulu vähenes vähem kui materjalikulu, sest sõrestikudisaini lisamine suurendas servade kogust. See tähendab, et printer ei saa enam teha ainult pikki sirgeid käike, vaid peab kohati järgima sõrestikust tingitud lühemaid perimeetreid. Lühikeste perimeetrite printimisel on aga printeri kiirus reeglina väiksem kui pikkade sirgete puhul. Avade lisamise teel vähendati olulisel määral materjalikulu ja sellest tulenevalt detailide massi. Kuna kõigisse servadesse prinditakse perimeetrid, mitte sisetäide, on sõrestikuga detailis ka proportsionaalselt rohkem täismaterjali kui ilma sõrestikuta, mis muudab detaili tugevamaks.

Arenduse käigus selgus, et ülemise plaadi algne sõrestikuga lahendus oli tuntavalt painduv. Seetõttu lisati nii ülemise kui alumise plaadi tagumiste detailide keskele detaili välisperimeetriga paralleelne lisatugevdus (alumisel plaadil alates ver0.1.0+1.1, ülemisel alates ver0.2.0+1.3).

Vähendamaks tolmu ja muu ebasoovitava sattumist põrandalt roboti sisemusse asendati osa alumise plaadi materjalisäästuavadest täismaterjaliga (vt Joonis 13). Detailide alumisele küljele lisati 0,6 mm paksune täismaterjalist osa, mis küll veidi suurendas printimisaega ja materjalikulu, kuid andis tugevalt märgatava erinevuse detailide jäikuses. Kuna alumisele plaadile rakendub suurim koormus, on selle puhul kõige olulisem, et see oleks piisavalt jäik.



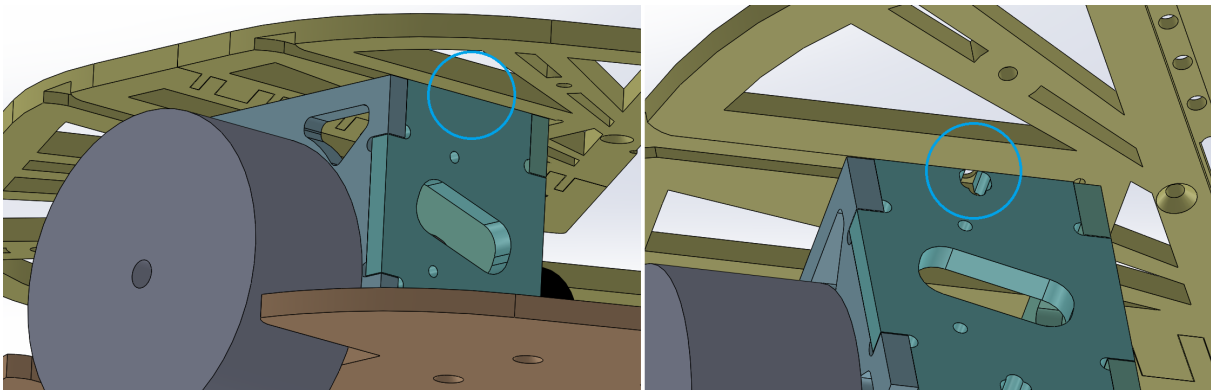
Joonis 13. Alumine plaat, kuhu on lisatud 0,6 mm paksune täismaterjalist osa võõrkehade tõkkeks ja jääkuse suurendamiseks (detailid ver1.0.0+1.5)

Kuna raamimoodul toetab kogu robotit, on oluline alumine ja ülemine plaat omavahel stabiilselt siduda. Järgnevalt ongi kirjeldatud raamimooduli alumise ja ülemise plaadi omavahel ühendamist.

### 5.2.3. Plaatide ühendamine

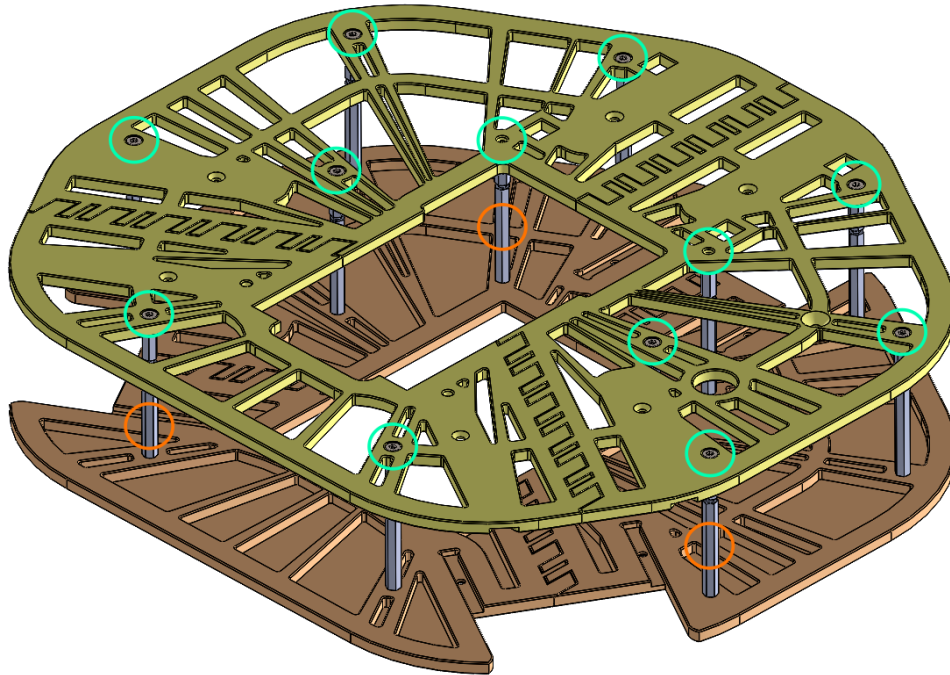
Gen 2.1-s ühendasid raamimooduli plaate polükarbonaadist vaheseinad, mis toimisid ka mootorikontrollerite kaitse- ja kinnitusdetailidena. Kuna gen 3 elektroonika paikneb kõik ühe suure trükkplaadi peal, ei ole alumise ja ülemise plaadi ühendamine gen 2.1 meetodil enam otstarbekas. Vaheseinte kasutamisel oleks vaja trükkplaati teha nende jaoks augud, mis raiskaks saadaolevat ruumi.

Vaheseinte asemel kasutati ära mootorimoduleid, sest mootorimoodulite soonte kohal ei ole raamimooduli detailides materjalisäästuavasid ning mootorimoodulid on juba niigi raamimooduli alumise plaadi külge poltidega ühendatud. Ühendades iga mootorimooduli kahe poldiga ülemise plaadi külge sarnaselt alumise plaadiga, tekkis juurde kuus ühenduspunkti. Selle saavutamiseks oli vaja lisada augud mootorimoodulite külgede ülemisse serva ning raamimooduli ülemise plaadi detailide vastavatesse kohtadesse (vt Joonis 14).



Joonis 14. Mootorimoodulite raamimooduli ülemise plaadi (ver0.1.0+1.1) külge kinnitamise võimalus enne (vasakul) ja pärast (paremal) aukude lisamist. Muutusega piirkond on välja toodud siniste ringidega. Vasakul mootorimooduli küljedetail ver0.0.0+0.0, paremal ver0.0.0+1.0.

Lisaks mootorimoodulite kaudu ühendamisele lisati raamimooduli plaatide vahele metallist puksid, mis seovad plaadid jäigalt. Iga puksisammas koosneb ühest 40 mm ja ühest 15 mm pikkusest puksist. Pukside asukohti näitab Joonis 15. Iga sammas koosneb kahest puksist, mitte ühest 55 mm puksist, sest 40 mm ja 15 mm pukside vahele hakkab kinnituma trükkplaat.



Joonis 15. Raamimoodul (ver1.0.0+1.5). Rohelisega on märgitud alumist ja ülemist plaati ühendavate pukside poldiavad ülemises plaadis. Oranžiga on näidatud osa puksidest.

Pukside asukohad on valitud selliselt, et ühenduspunktid oleksid jaotatud võimalikult ühtlaselt, toetades samas trükkplaati murdumisohtlikest kohtadest. Trükkplaat kinnitatakse pukside vahele paralleelselt alumise ja ülemise plaadiga. Kaks puksi on paigutatud selliselt, et koos arvutimooduli puksidega tekivad keret vertikaalselt läbivad tugisambad.

Käesolevas alampeatükis kirjeldati alumise ja ülemise plaadi omavahelisi ühendusi. Sama oluline on tagada jäikus ka kummagi plaadi tasandil. Järgnevalt on kirjeldatud kolmeks tükiks tehtud alumise ja ülemise plaadi tükkidevaheliste ühenduste arendust.

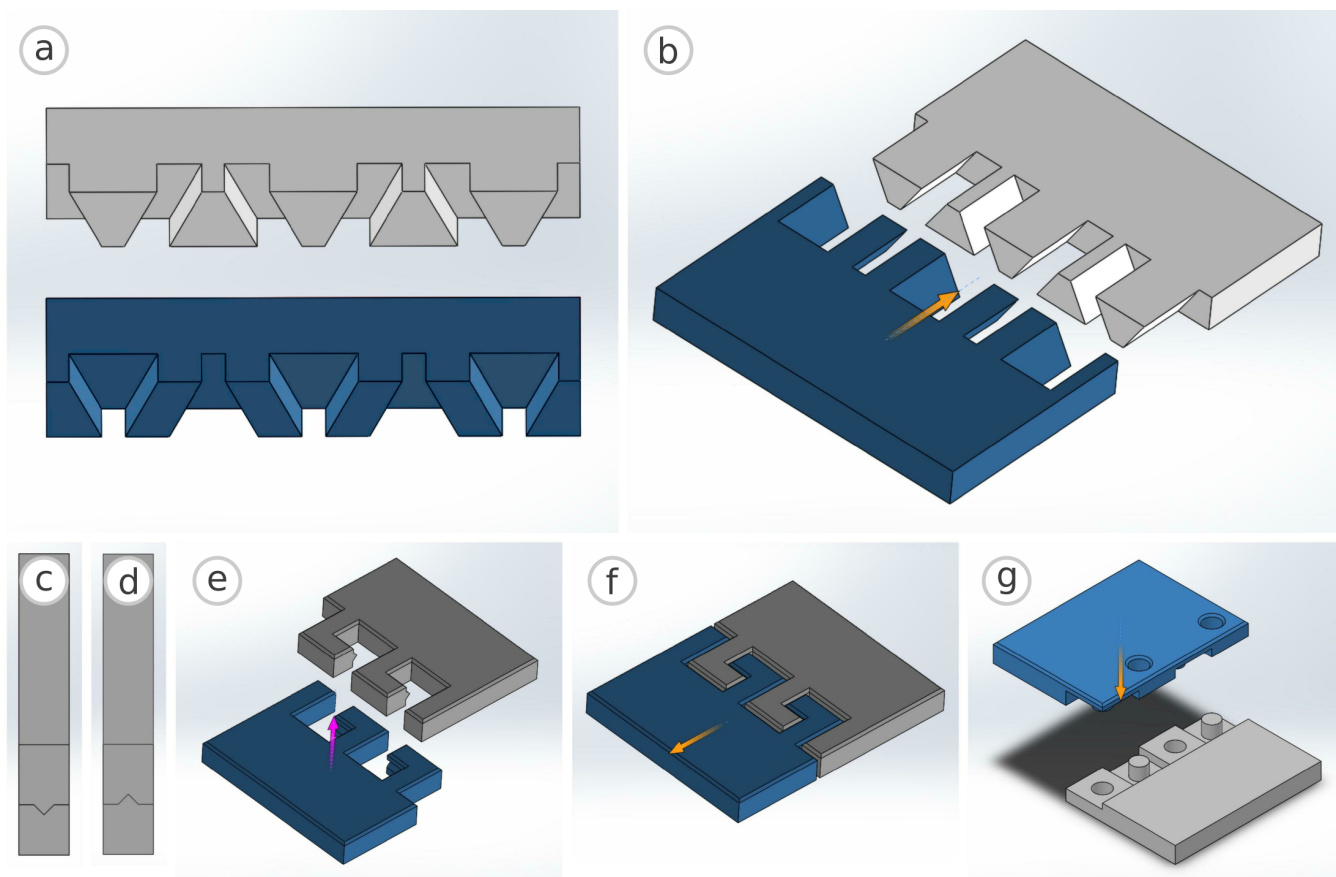
#### 5.2.4. Liitekohtade jäikus

Gen 2.1 raamimooduli detailide kolmeks tükiks tegemine lahendas nende kodukasutaja printerisse mitte mahtumise probleemi. Ilma lisamuudatusteta ei ole selline lahendus aga sobiv. Tükide servade lihtsalt üksteise kõrvale paigutamine ei taga piisavalt tugevat ja stabiilset ühendust, kuna plaadi painutamisel rakenduks kogu jõud mootorimoodulite külgede ja raamimooduli plaatide kinnituspunktidesse. Lisaks ei

joondu detailid sellise lahenduse korral piisavalt stabiilselt, et robotit oleks mugav kokku panna.

Mehaaniliselt tugeva tulemuse saavutamiseks oli vaja disainida sobiv liitekohtade ühendus. Katsetati kolme erineva liitega, mis annavad jäikuse erinevates telgedes. Sarnaselt muude detailidega võeti ka kõigi liitevariantide disainimisel üheks eesmärgiks, et need oleksid ilma tugistruktuurideta 3D-prinditavad. Liidete puhul on see aga eriti oluline, kuna tugistruktuuride eemaldamisel võib detaili pind jääda ebatasane, mis liite puhul takistaks selle sihipärast kasutamist.

Kuna raamimooduli detailid on rattamoodulite kohalt fikseeritud, ei ole liite puhul vajalik kolmes teljes fikseeritus. Piisab, kui ühendus on jäik vertikaalsuunas ja ühes horisontaalsuunas, sest see annab piisava fikseerituse roboti kokkupanemisel ning peale poltide kinnitamist detailid enam rohkem liikuda ei saa. Liite arendusprotsessis katsetati erinevaid liiteid, millest kõige perspektiivsemad olid tuvisabaliide, lihtne legoklotsilaadne liide ja sakiline lukustuv liide. Disainitud liitevariante kujutab [Joonis 16](#).



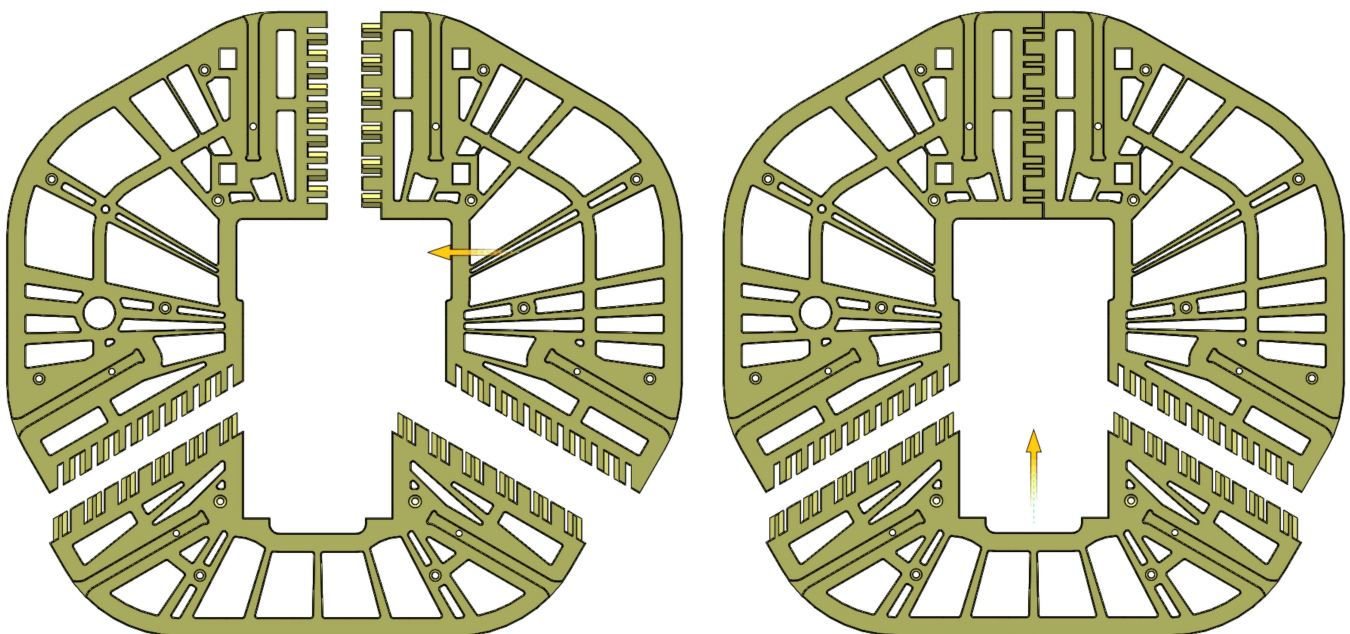
*Joonis 16. Disainitud plaadiliitevariandid: tuvisabaliide (a–b), sakilise lukustuva liite ristlõiked ja kaks poolt (c–f), legoklotsilaadne liide (g). Nooled näitavad detailide ühendamise suunda.*

Robotondi disainis kasutamiseks valiti tuvisabaliide selle tugevuse ja töökindluse tõttu. Kõik kaldpinnad on 60-kraadise nurga all, mis tagab suure kontaktpinna, kuid ei vaja veel printimisel tugistruktuure. Tuvisabaliide on fikseeritud vertikaalteljes ja plaatide vastastikus suunas, mis on parim kahe telje

kombinatsioon antud rakenduse jaoks. Tuvisabaliide, mida kasutatakse laialdaselt tiseritöös ja mille kasutusnäiteid pärineb juba Vana-Egiptusest, on üks tugevamaid võimalikke liiteid [114, 115]. Tuvisabaliidet on kirjanduses ka 3D-printimise kontekstis käsitletud kui mehaaniliselt tugevat liidet, insener Eiki Martinson toob selle liite eelisenäiteks välja ka tugistruktuuridevaba printimise [116].

Sobiva liite valikul katsetati ka lihtsat legoklotsidest inspireeritud liidet ja sakilist lukustuvat liidet. Legoklotsilaadset liidet, mis on fikseeritud plaatide külg- ja vastastikusel suunas, on lihtne printida ja eeliseks on ka mõlema poole ühesugune kuju. Robotondi kere jaoks seda siiski ei valitud, sest vertikaalteljes ei ole tagatud jäikust ja seetõttu võib liide plaadi painutamisel lahti tulla. Sakiline lukustuv liide tugistruktuuridevaba printimise korral ei lukustu, vaid praktikas jääb vertikaalteljes pööratavaks, mistõttu seda ka Robotondi kere jaoks ei valitud. Samuti on liide ebavajalikult keerukas ja sisaldab palju väikesi detaile, mis võivad printimisel ebaõnnestuda.

Kuna raamimooduli mõlemad plaadid koosnevad kolmest detailist, oli oluline pöörata tähelepanu detailide ühendamise suunale ja järjekorrale. Tuvisabaliitega ühendatavate detailide kokkupanemise samme ülemise plaadi näitel kirjeldab [Joonis 17](#). Alumise plaadi juures rakendati sama meetodikat.



*Joonis 17. Ülemise plaadi (ver1.0.0+1.5) kokkupanemise sammud*

Liidete jaoks katsetati erineva tugevusega iste. Ist pidi olema piisavalt tihe, et detailid püsiks stabiilselt koos, kuid mitte nii tihe, et oleks raskendatud detailide kokkupanemine. Kuna 3D-printitud detailide täpsus varieerub, oli keeruline leida liite hammaste vahelise lõtku sobivat suurust. Katsetati 0, 0,02, 0,05 ja 0,1 mm suuruste lõtkudega. Leiti, et kuigi vahel andsid 0,02 ja 0,05 mm parima tulemuse, oli tulemus siiski korduvalt liiga tiheda istuga. Seetõttu valiti 0,1 mm suurune lõtk, mis andis stabiilselt häid

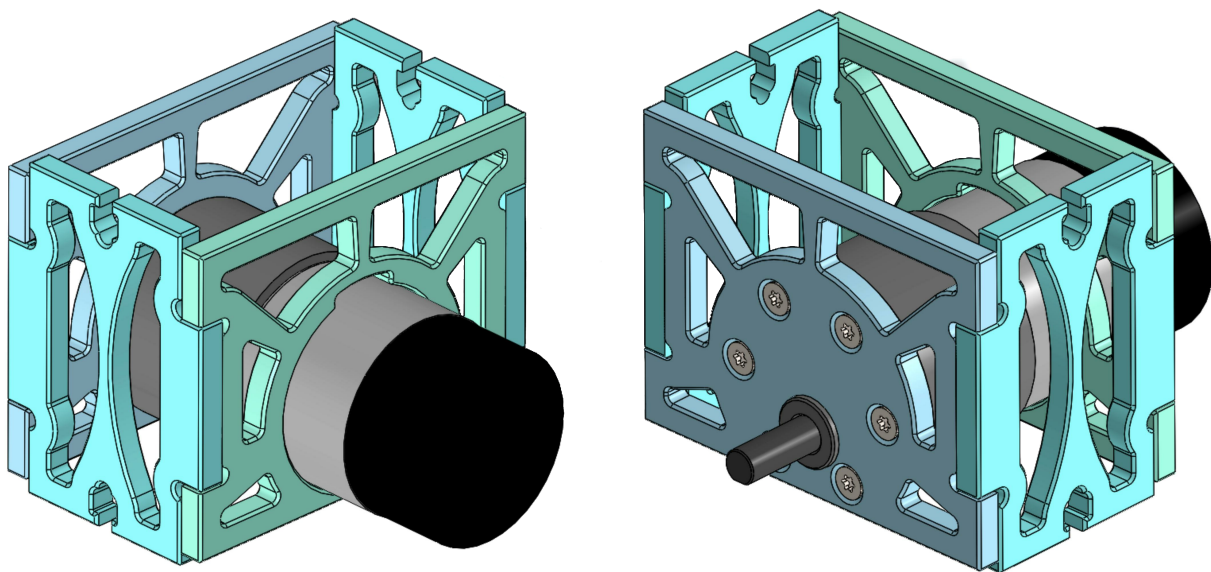
tulemusi, kuigi kohati saavutas oodatust vähem tiheda istu. Kokkupandud roboti puhul see aga probleeme ei tekita, kuna muud detailidevahelised ühendused hoiavad kere kindlalt koos.

Kuna Robotont on mobiilne robot, on oluline tagada ka selle mootorite töökindel kinnitatus. Järgnevalt on kirjeldatud 3D-prinditavate mootorimoodulite arendust.

### 5.3. Mootorimooduli arendus

Robotont on madala põhjaga robot, mistõttu on sellega lihtne takistuste taha kinni jääda. Selle võimaluste piires leevendamiseks viidi mootorid madalamale, et tõsta roboti põhja. Selle saavutamiseks liigutati mootoriavasid mootorimooduli esi- ja tagadetailis. Maksimaalselt oli mootoriavad võimalik tuua 2,5 mm madalamale, mille tulemusel tõusis roboti põhi pörandast 2,5 mm kõrgemale. Selleks, et rataste uue paiknemise juures need ka raamimooduli alumisest plaadist läbi mahuksid, tehti rataste avad seal laiemaks, eemaldades avade äärtest mootorimoduleid oma kohtadele juhtivad sooned.

Roboti 3D-prinditud detailidega otseses kokkupuutes olevatest komponentidest kõige kõrgema temperatuuriga on mootorid. Selleks, et vältida mootorimoodulite liigset kuumenemist, on oluline, et mootorimooduli detailides oleksid avad õhu liikuvuse tagamiseks. Ka Robotont gen 2.1 mootorimoodulite detailides olid avad, kuid gen 3 jaoks tehti need suuremaks, et üheaegselt parandada õhu juurdepääsu ning vähendada materjalikulu. Ka mootorimoodulite puhul rakendati ühes punktis koonduvate kiirte disaini. Kõikidesse servadesse jäeti 5 mm materjali ja ülejäänud osasse paigutati ühtlaste vahedega tugikiired. Mootorimoodulit koos mootoriga kujutab [Joonis 18](#).



*Joonis 18. Mootorimoodul (ver1.0.0+1.5) koos mootoriga, tagantvaade (vasakul) ja eestvaade (paremal). Visualiseerimiseks kasutatud mootori CAD mudel pärineb gen 2.1 koostumudelist [117].*

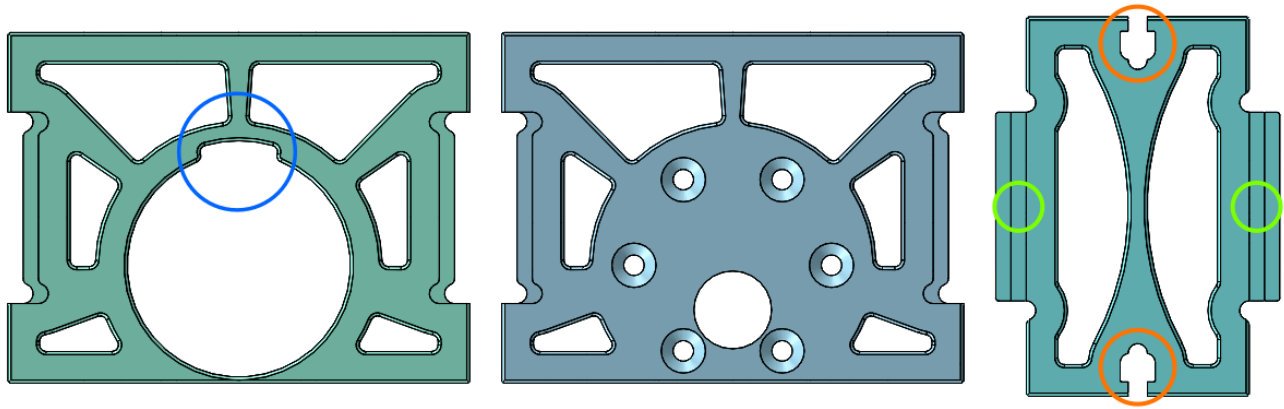
**Tabel 4** näitab materjalisäästuavade lisamise mõju mootorimooduli detailide 3D-printimise aja- ja materjalikulule. Tabelis on võrreldud ilma muudatusteta detailide (ver0.0.0+0.0) ja materjalisäästuavadega (ver0.1.0+1.2) detaile. Printimisaegade hindamiseks kasutati PrusaSlicer tarkvara vaikeseadeid mallist "0.20mm QUALITY @MK3". Tabel on toodud võrdlemaks, kui palju mõjutas avade lisamine printimise aja- ja materjalikulu ja ei kajasta detailide lõplikke printimisaegu ja materjalikulu.

*Tabel 4. Mootorimooduli detailide printimise aja- ja filamendikulu enne (ver0.0.0+0.0) ja pärast (ver0.1.0+1.2) materjalisäästuavade lisamist*

Detail	Printimisaeg			Filamendikulu (g)		
	Enne	Pärast	Muutus	Enne	Pärast	Muutus
Eesmine	57 min	1 h 0 min	+3 min	11,9	11,7	-0,2
Tagumine	43 min	45 min	+2 min	9,6	9,2	-0,4
Külg	32 min	32 min	0 min	7,7	6,8	-0,9
<b>Kokku</b>	<b>2 h 12 min</b>	<b>2 h 17 min</b>	<b>+5 min</b>	<b>29,2</b>	<b>27,7</b>	<b>-1,5</b>

Materjalisäästuavade lisamine vähendas materjalikulu 1,5 g (5%), kuid ajakulu hoopis tõusis 5 minuti (4%) võrra. Rohkemate avade lisamine tõstab servade kogust, mis põhjustab printimisaja tõusu, kuid lisab detailile tugevust, kuna täismaterjalist perimeetrid on sisetäitest tugevamad.

Printides mootorimooduli detailid ilma muudatusteta (ver0.0.0+0.0) selgus, et mootorimooduli raamimooduli külge kinnitamiseks vajalikud mutrid ei mahtunud mootorimooduli külgedes nende jaoks mõeldud avadesse. Probleemi lahendamiseks prinditi välja mutriavadega testdetailid, kus mutriavade suurused varieerusid sammuga 0,1 mm. Leiti, et gen 2.1-s kasutatud 5,45 mm asemel saavutatakse optimaalne ist 5,5 mm laiuse avaga. Parandati ka mutriavade kuju. Gen 2.1-s kasutati ümarate kujuga mutriavasid, sest CNC-freesiga ei ole võimalik toota teravaid sisnurki. Kuigi ka 3D-printides pole võimalik saavutada täiesti teravaid sisnurki, on võimalused laiemad kui CNC-freesi puhul. Seetõttu oli otstarbekas muuta mutriavasid selliselt, et mutriava profiil on alumises osas kandiline (vt [Joonis 19](#), kus viidatud avad on tähistatud oranžide ringidega). Mõlema muudatuse koosmõjul paranes märgatavalt mutrite paigaldamise protsessi mugavus. Gen 2.1-s oli mutrite paigaldus ette nähtud teostada kruustangide abil, gen 3-s on mutrid võimalik paigaldada käsitsi.



*Joonis 19. Mootorimooduli tagumine-, eesmine- ja küljedetail (ver1.0.0+1.5). Sinise ringiga on tähistatud mootorijuhtmete jaoks lisatud ava, oranžide ringidega muudetud mutriavad, roheliste ringidega ühenduspilud mooduli kokkupanemiseks.*

Gen 2.1 mootorimoodulite kokkupanekul oli probleemiks, et tükide omavaheline ist ei olnud piisavalt tihe, et mootorimoodul ilma kinnitamata või kinni hoidmata koos püsiks. Probleemi lahendamiseks tehti gen 3 mootormooduli detailide omavaheline ist tihedamaks. Kuna mootorimoodulit hoiavad koos küljedetailid, piisas küljedetaili servas oleva kinnituspilu kitsamaks tegemisest (vt [Joonis 19](#), kus viidatud pilud on tähistatud roheliste ringidega). Kinnituspilu optimaalse laiuse leidmiseks prinditi välja erinevate mõõtmetega testdetailid ning valiti kõige mugavamalt kokkupandava tulemuse andnud variant.

Mootorimooduli kokkupanekul ei mahtunud gen 2.1-s mootori juhtmed vabalt läbi mootoriava, mis põhjustas ebamugavust kokkupanekul ning suurendas mootorijuhtmete kahjustumise tõenäosust. Probleemi lahenduseks lisati mootorimooduli tagadetailis mootoriava kõrvale juhtmete jaoks pilu (vt [Joonis 19](#), kus viidatud ava on tähistatud sinise ringiga). Pilu lisamine muutis mootori paigaldamise märgatavalt mugavamaks.

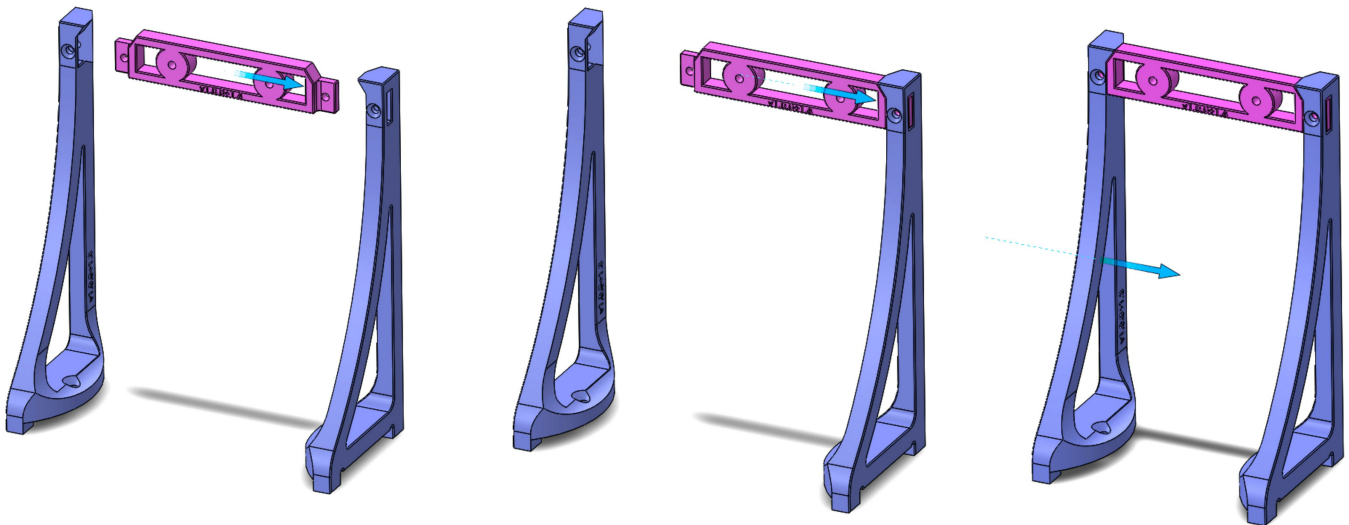
Mootorimoodulite eesmärk on roboti mootorite fikseerimine. Lisaks mootoritele on Robotondil ka teisi seadmeid, mis peavad olema stabiilselt kinnitatud, näiteks kaamera. Järgnevalt ongi kirjeldatud 3D-prinditava kaameramooduli arendus.

#### **5.4. Kaameramooduli arendus**

Robotont gen 2.1 kaameramoodul koosnes nelikantprofiiliga alumiiniumpostidest ning polükarbonaadist plaadist, mille külge kinnitus kaamera. Kaameramoodulit sidusid raamimooduliga kolmnurksed polükarbonaadist detailid, mis kinnitusid poltide ja tappidega raamimooduli ülemise plaadi külge. Kokku koosnes gen 2.1 kaameramoodul 5 detailist. Selliste detailide 3D-printimine ei annaks tugevat tulemust, sest kitsas plastikust post on palju nõrgem kui kitsas alumiiniumist post. Samuti annaks kaamerataguse plaadi postide külge kinnitamine nõrga tulemuse, kui kasutada gen 2.1 kaameramooduli

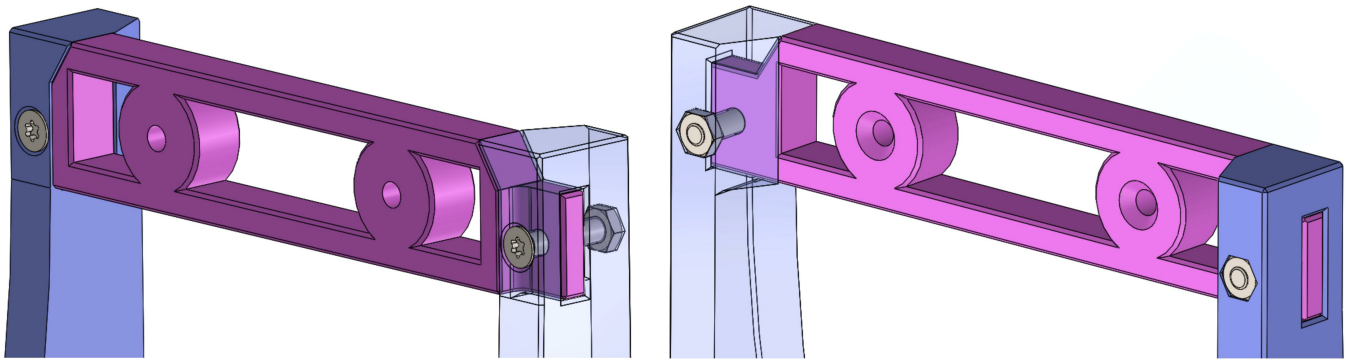
kuju ja mõõtmetega detaile 3D-prindituna. Robotondi õppetöös kasutamise käigus on selgunud, et kaameramoodul peab olema tugev, kuna näeb välja nagu sang ja seetõttu kasutatakse seda intuiitiivselt Robotondi tõstmiseks. Gen 3 kaameramooduli disaini juures võeti eesmärgiks säilitada kaameramooduli tugevust, vähendades detailide arvu ja optimeerides disaini 3D-printimise jaoks.

Kaameramoodul disainiti 3 detailina. Kogu mooduli ühe detailina printimine oleks mugav, kuid ei ole otstarbekas, sest eri detailid peavad olema eri suundades tugevad. Detaile ja nende omavahel ühendamise samme kujutab [Joonis 20](#). Kaamerataguse plaadi ([Joonis 20](#) roosa detail) külge kinnitub Intel RealSense D435 kaamera kahe poldiga, mille jaoks on detailis vastavatel kohtadel augud.



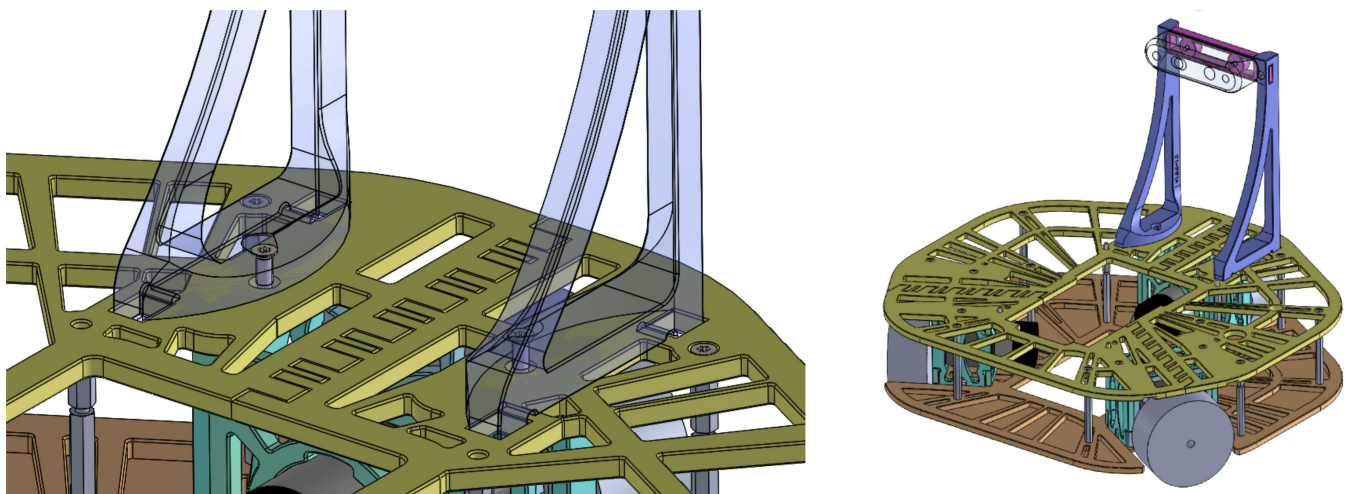
*Joonis 20. Kaameramooduli ver1.0.0+1.4 detailid ja nende ühendamise sammud*

Kaameramooduli disainimisel arvestati võimalusega, et robotit tõstetakse kaameramoodulist, kuna see näeb välja nagu sang. Sellest tulenevalt disainiti kaameramooduli küljed tugevuse tagamiseks kolmnurksetena. Detailidevaheline ühendus loodi selliselt, et roboti tõstmisel toetavad kaameratagust detaili kaameramooduli külgede ülemistesse otstesse disainitud kaldpinnad. Kaamerataguse plaadi otstes on tapid, mis istuvad külgede sees. Ühendused on fikseeritud läbivate poltidega, mida omakorda fikseerivad mutrid. Ühenduse suurendatud ja osaliselt pool-läbipaistvat vaadet kujutab [Joonis 21](#).



*Joonis 21. Kaameramooduli (ver1.0.0+1.4) detailide omavahelised ühendused, mis toestavad kaameratagust detaili (roosa) roboti kaameramoodulist tõstmisel*

Gen 2.1 kaameramooduli roboti küljest eemaldamine oli tülikas, sest poldid kinnitusid altpoolt. Gen 3 disainis toodi kinnitus kere ülemisele küljele. Kaameramoodul kinnitub raamimooduli külge kahe poldi ja nelja tapiga (Joonis 22). Poldid kinnituvad tagumise mootorimooduli külgede külge läbi raamimooduli ülemise plaadi, pakkudes selliselt lisäühendust kogu roboti vertikaalsuunas. Ka selle ühenduse osas pöörati tähelepanu, et ühendus peaks roboti kaameramoodulist tõstmisele vastu. Kaamera positsioon kere suhtes jäi gen 2.1-ga samaks, et vältida muudatuste vajalikkust tarkvarakihis. Kaameramooduli paiknemist roboti peal näitab Joonis 22.



*Joonis 22. Kaamera- ja raamimooduli ühendus lähivaates (vasakul); kaameramoodul roboti üldvaates, kus kaameramoodul on näidatud lilla ja roosa värviga (paremal). Roosa värviga tähistatud detaili külge kinnituv RealSense kaamera (CAD mudel [117]) on kujutatud piirjoontega.*

Disainimuudatuste mõju kaameramooduli printimisajale ja filamendikulule näitab Tabel 5. Printimisaegade hindamiseks kasutati PrusaSlicer tarkvara vaikeseadeid mallist "0.20mm QUALITY @MK3". Tabel on toodud võrdlemaks, kui palju uue disaini printimise aja- ja filamendikulu erineb teoreetilisest ilma muudatusteta detailide aja- ja filamendikulust. Tabel ei kajasta detailide lõplikke

printimisaegu ja filamendikulu.

Tabel 5. Kaameramooduli detailide printimise aja- ja filamendikulu enne (ver0.0.0+0.0) ja pärast (ver0.1.0+1.2) ümberdisainimist

Detail	Printimisaeg			Filamendikulu (g)		
	Enne	Pärast	Muutus	Enne	Pärast	Muutus
Kaameratagune	33 min	46 min	+13 min	7	9	+2
Küljed	33 min + 46 min (=1 h 19 min) (x2)	1 h 42 min (x2)	+23 min (x2)	9 + 11 (x2)	23 (x2)	+3 (x2)
<b>Kokku</b>	<b>3 h 11 min</b>	<b>4 h 10 min</b>	<b>+59 min</b>	<b>47</b>	<b>55</b>	<b>+8</b>

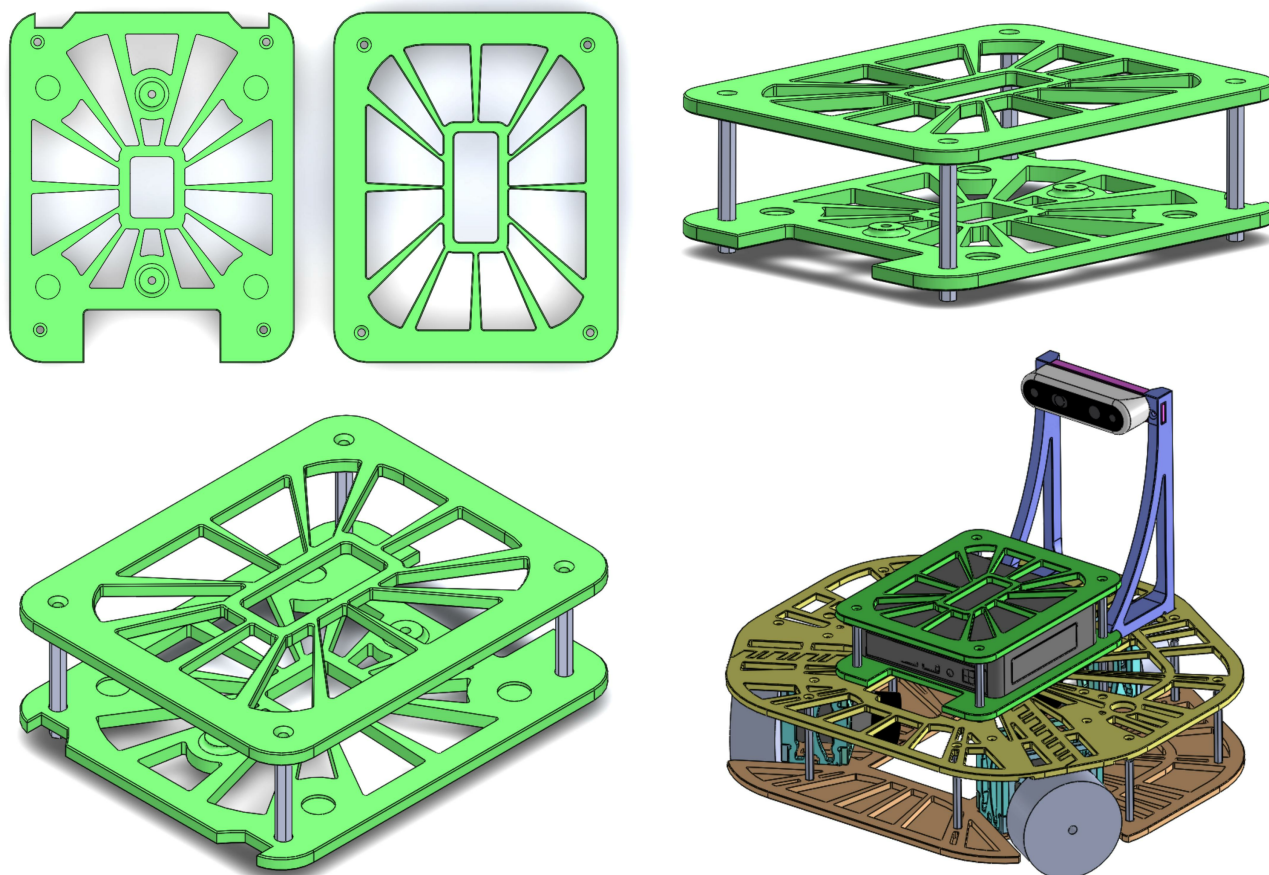
Gen 2.1 koostus kaamerataguse detaili üleval hoidmiseks kasutatud 1 mm seinapaksusega nelikantprofiil oleks õõnsana 3D-printides liiga habras. Seetõttu on ilma muudatusteta detailide puhul arvestatud nende postide printimisega mitteõõnsana. Ümberdisainitud kaameramooduli printimine võtab 59 minutit (31%) kauem aega ja 8 g (17%) rohkem materjali kui ilma muudatusteta detailide printimine, kuid seda õigustab ümberdisainitud kaameramooduli detailide suurem tugevus, mis tuleb sellest, et detailide kuju on optimeeritud 3D-printimiseks.

Kaamerast tuleva info töötlemiseks on Robotondil pardaarvuti, mis kinnitub seda kaitsvasse arvutimoodulisse. Järgnevalt on kirjeldatud arvutimooduli disain.

## 5.5. Arvutimooduli arendus

Robotondi raamimooduli peal paikneb eraldi arvutimoodul, mille eesmärk on kaitsta robotit juhtivat arvutit ning pakkuda kohta lisaseadmete kinnitamiseks. Sarnaselt raamimooduliga koosneb arvutimoodul alumisest ja ülemisest plaadist ning neid ühendavatest metallpuksidest, samuti kuuluvad arvutimooduli juurde arvuti- ja raamimoodulit omavahel ühendavad puksid.

Gen 2.1-s olid arvutimooduli plaadid tehtud täismaterjalist. Gen 3 arvutimooduli mõlema plaadi juures on kasutatud mooduli keskpunktis koonduvate kiirte ja materjalisäästuavade disaini. Lisatud avade kuju ja paigutust näitab [Joonis 23](#). Mooduli alumise plaadi avad on paigutatud selliselt, et säiliks plaadi keskel olevad arvuti ühendamiseks mõeldud poldiaugud ja et arvuti jalad toetuksid stabiilselt täismaterjali peale.



Joonis 23. Arvutimooduli (ver0.2.0+1.2) detailid (üleväl vasakul), isomeetriline vaade eest (üleväl paremal) ja tagant (all vasakul) ning üldvaade, mis näitab arvutimooduli ja arvuti paiknemist roboti peal. Pardaarvuti visualiseerimiseks kasutati Intel NUC ametlikku mudelit [118].

Materjalisäästuavade lisamise mõju arvutimooduli detailide printimisajale ja filamendikulule näitab Tabel 6. Printimisaegade hindamiseks kasutati PrusaSlicer tarkvara vaikeseadeid mallist "0.20mm QUALITY @MK3". Tabel on toodud võrdlemaks, kui palju muutsid materjalisäästuavad printimise aja- ja filamendikulu, ja ei kajasta detailide lõplikke printimisaegu ja filamendikulu.

Tabel 6. Arvutimooduli detailide printimise aja- ja filamendikulu enne (ver0.0.0+0.0) ja pärast (ver0.1.0+1.1) materjalisäästuavade lisamist

Detail	Printimisaeg			Filamendikulu (g)		
	Enne	Pärast	Muutus	Enne	Pärast	Muutus
Alumine	3 h 11 min	2 h 29 min	-42 min	59	41	-18
Ülemine	3 h 19 min	2 h 53 min	-26 min	63	43	-20
<b>Kokku</b>	<b>6 h 30 min</b>	<b>5 h 22 min</b>	<b>-1 h 8 min</b>	<b>122</b>	<b>84</b>	<b>-38</b>

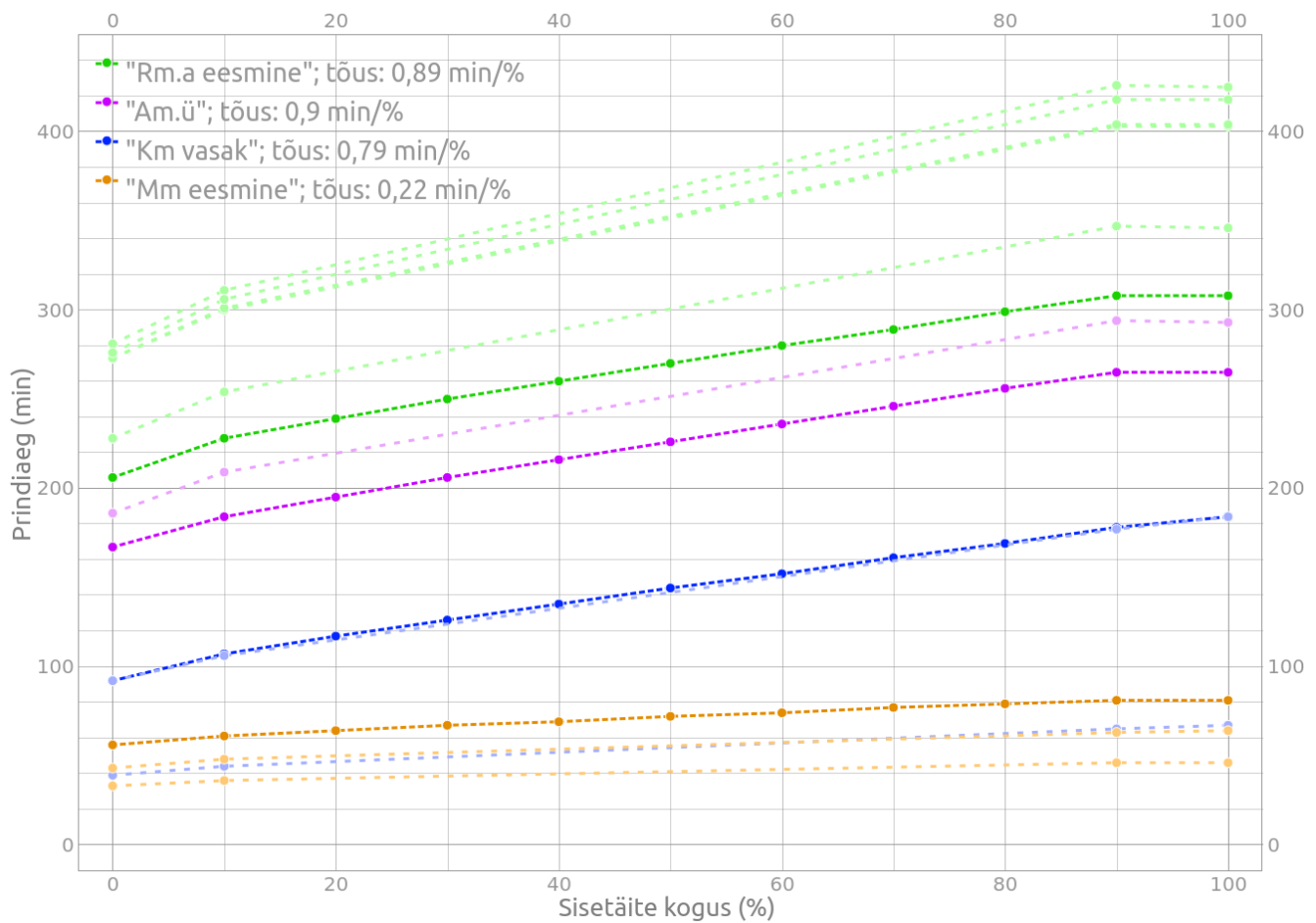
**Tabel 6** näitab, et materjalisäästuavade lisamise tulemusel vähenes ajakulu 68 minuti (17%) ja materjalikulu 38 g (31%) võrra.

Sarnaselt gen 2.1-ga kinnitub pardaarvuti alumise plaadi külge kahe poldiga. Pardaarvuti toestamiseks lisati aga nende avade ümber kõrgendused, et välistada alumise plaadi kaardumine pardaarvuti liiga tugevalt kinnitamisel ning fikseerida alumise plaadi ja pardaarvuti omavaheline kaugus. Pardaarvuti jalgade jaoks tehti alumisse plaati süvistused, et tagada pardaarvuti kindel paiknemine ja mugav paigaldus. Lisaks tehti mitmeid väiksemaid kohandusi, et tagada gen 3 moodulite omavaheline ühildumine.

Kõik arendusprotsessi kirjelduse juures toodud prindiajad olid saadud PrusaSliceri vaikesätetega mallist "0.20mm QUALITY @MK3". Vaikeseaded, kuigi teatud juhtudel kasulikud, ei pruugi aga Robotondi printimisel parimat tulemust anda. Järgnevalt on toodud analüüs, mille eesmärk oli optimeerida vaikeseadeid 3D-prinditud kere vastupidavuse tõstmiseks.

## **5.6. Analüüs optimaalsete printerisätete leidmiseks**

Detailide tugevus sõltub sisetäite kogusest. Sisetäite koguse suurendamine tõstab aga ka prindiaega ja materjalikulu ning seeläbi detaili massi. Sisetäite koguse ja prindiaja seoseid kõikide detailide jaoks kujutab [Joonis 24](#). Kõik prindiajad on saadud PrusaSliceri abil, kasutades vaikeprofili "0.20mm QUALITY" ja sisetäite kuju "*rectilinear*". Iga mooduli ühe detaili jaoks leiti prindiajad 10% sisetäite protsendi sammuga. Ilmnes, et sisetäite vahemikus 10—90% on prindiaja tõus kõigi vaadeldud detailide jaoks lineaarne. Seega teiste detailide jaoks leiti prindiajad ainult 0%, 10%, 90% ja 100% sisetäite jaoks ning vahepealsed väärtused interpoleeriti.



Joonis 24. Prindiaja sõltuvus sisetäite kogusest kõikide detailide printimisel. Rohelisega on tähistatud raamimooduli, lillaga arvutimooduli, sinisega kaameramooduli ja oranžiga mootorimooduli detailid. Tumedama värviga on näidatud raamimooduli alumise plaadi (Rm.a) esidetail, arvutimooduli ülemine (Am.ü) detail, kaameramooduli (Km) vasak külg ja mootorimooduli (Mm) esidetail. Kahvatute värvide ja hõredamate joontega on näidatud teised samasse moodulisse kuuluvad detailid.

Jooniselt on näha, et kõigi detailide puhul tõuseb prindiaeg koos sisetäite koguse suurenemisega, kuid tõusu suurus varieerub. Tõus arvutati sisetäite 10—90% vahemiku järgi, sest selles piirkonnas on tõus lineaarne, samuti pole sellest vahemikust väljapoole jäävaid sisetäite koguseid printimisel otstarbekas kasutada. Tõus näitab, mitu minutit keskmiselt prindiajale lisandub, kui sisetäite kogust tõsta 1% võrra. Jooniselt on näha, et suurema prindiajaga detailide prindiaja tõus on suurem kui väikese prindiajaga detailidel. Mootorimooduli esidetailis on sisetäite proportsionaalne kogus väike, raamimooduli alumise plaadi esidetailis aga suurem, mistõttu selle prindiaeg suureneb samadel tingimustel ca 4 korda rohkem. Ilmnes ka, et enamike detailide puhul ei ole 90% ja 100% sisetäite koguse puhul prindiaegades erinevust.

Summeerides kõikide detailide prindiaegade tõusud ja arvestades iga detaili kogusega Robotondi keres,

leiti, et kere kõigi 23 detaili printimise koguaeg tõuseb sisetäite 10% võrra suurendamisel 122,2 minuti ehk ca 2 h võrra.

Lisaks sisetäite kogusele on 3D-prinditud detailide tugevuse oluliseks mõjuriks perimeetrite kogus, kuna see määrab täismaterjalist seinte paksuse. Leidmaks, milline sisetäite protsendi ja perimeetrite koguse kombinatsioon tagab detaili suurima jäikuse, viidi läbi empiirilised 3 punkti katsed detailile rakenduva survejõu ja detaili painde vahelise seose hindamiseks. Testdetaili paigutust mõõteseadmes ja mõõtmiseks ehitatud rakist kujutab [Joonis 25](#).

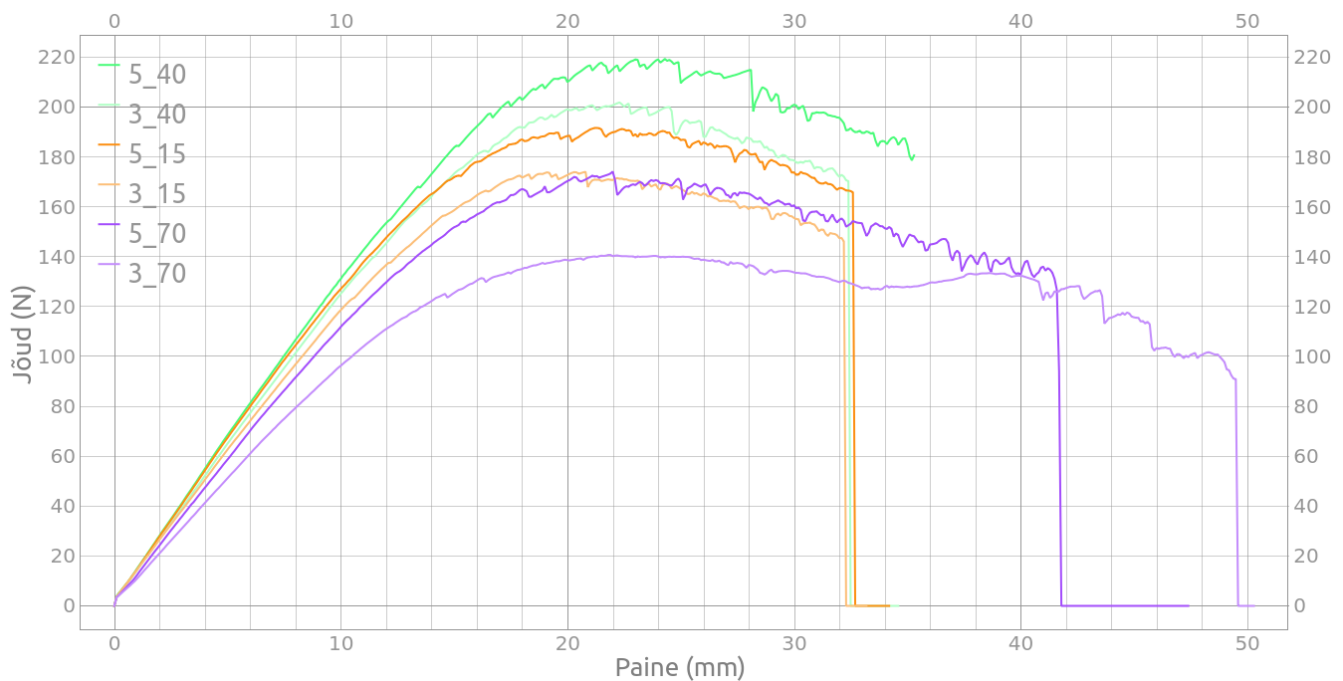


*Joonis 25. Jäikuskatse jaoks ehitatud alumiiniumist rakis (raam detaili all ja silindrikujuline detail surve ühtlaseks rakendamiseks) ja detaili paigutus mõõteseadmes*

Katse käigus mõõdeti detailile rakenduva jõu suurust ja mõõteseadme liigutatud vahemaad ehk detaili läbipainde suurust. Mõõteseadme liikus kiirusega 10 mm/min. Jõudu rakendati kuni detaili murdumiseni.

Esimese katse jaoks printiti PLA-st raamimooduli alumise plaadi esidetailid (ver0.1.1+1.3) 3 perimeetri ja 15%, 40% ja 70% sisetäite kogustega (edaspidi detailid 3\_15, 3\_40, 3\_70) ning 5 perimeetri ja samade sisetäite kogustega (edaspidi detailid 5\_15, 5\_40, 5\_70). Sisetäite kogused valiti selliselt, et need jaotuksid võimaliku vahemiku ulatuses ühtlaselt.

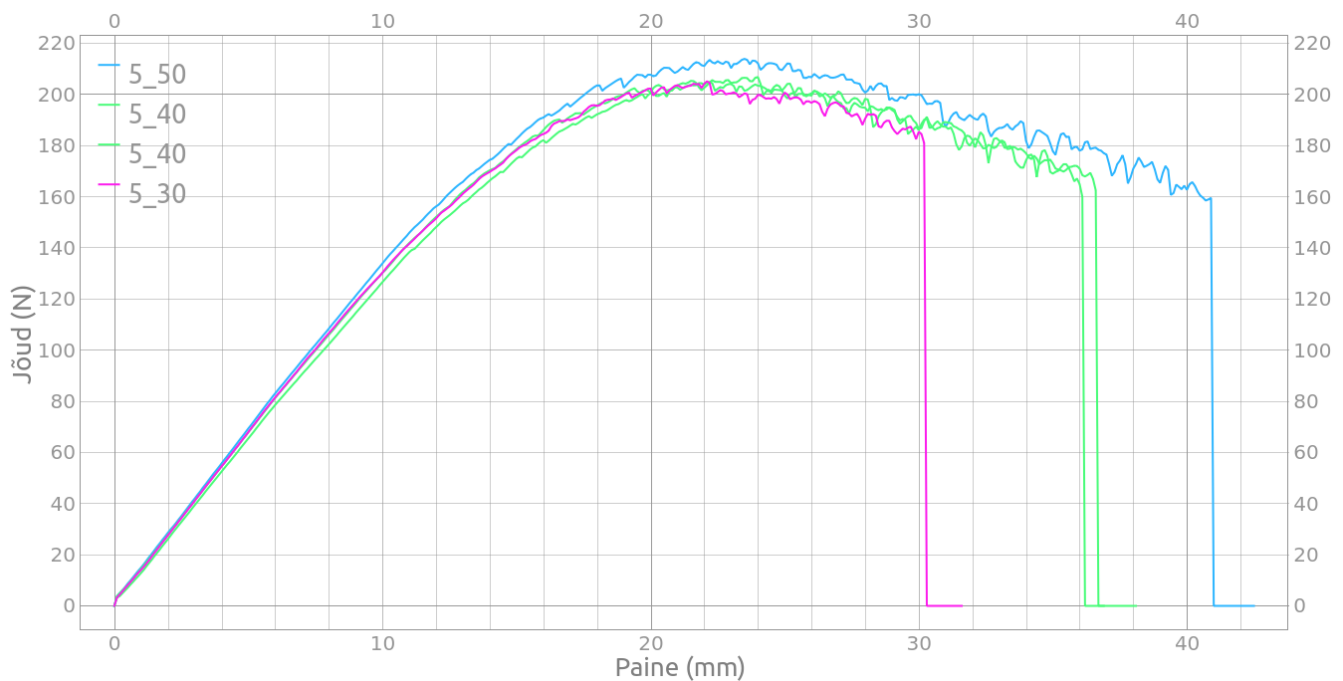
Esimese katse tulemusi kujutab [Joonis 26](#), kus on toodud testdetailide jõu-deformatsiooni kõverad. Jooniselt on näha, et 5 perimeetriga detailide paine sama jõu korral on väiksem kui 3 perimeetriga detailidel. Samuti on näha, et sama sisetäite protsendi puhul on 5 perimeetriga detailide elastse deformatsiooni piirkond suurem kui 3 perimeetriga detailidel. Elastse deformatsiooni piirkond on paindevahemik, kus jõu-deformatsiooni kõver on lineaarne.



Joonis 26. Esimese jääkuskatse tulemused 3 ja 5 perimeetri ning 15%, 40% ja 70% sisetäite kombinatsioonidega detailidega. Detailiga 5\_40 jäi katse mõõteseadme seiskumise tõttu lõpetamata.

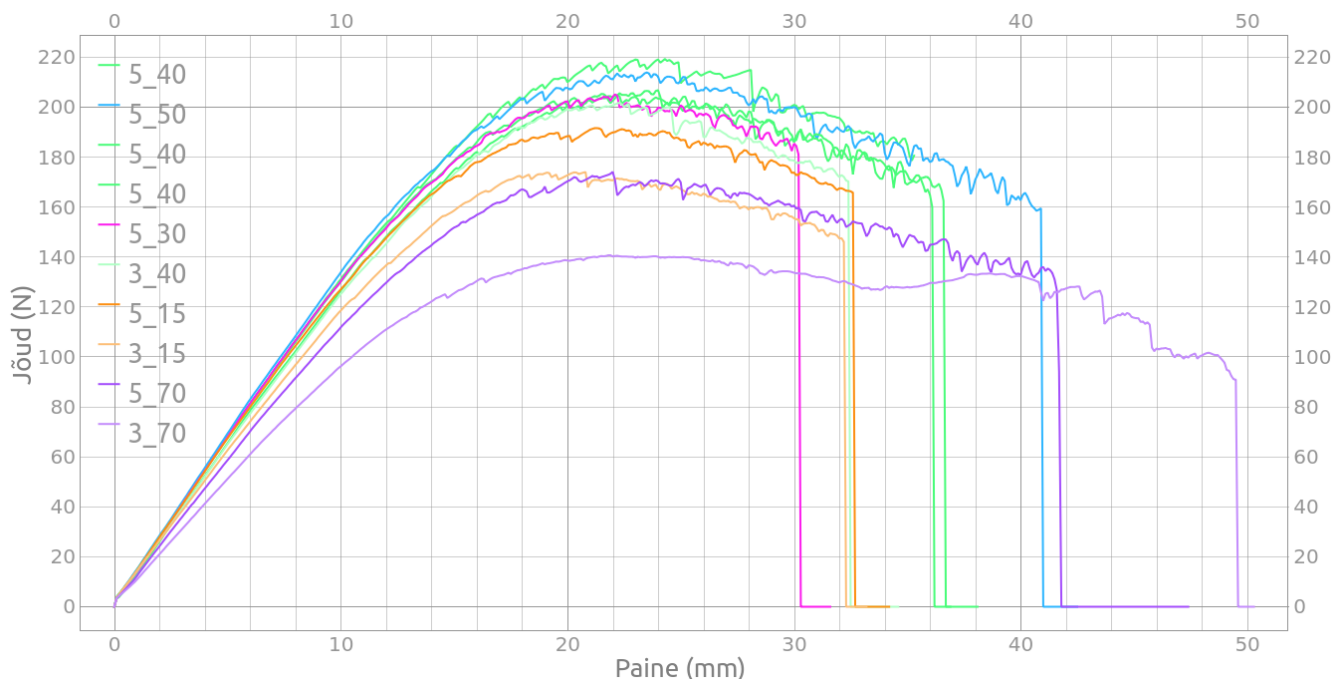
Katse tulemustest on näha, et suurem sisetäite protsent ei taga antud detailide puhul tingimata suuremat jääkust. Näiteks 5\_15-le rakendunud suurim jõud oli 192 N, 5\_40 puhul 219 N, 5\_70 puhul aga 174 N. Tulemus näitab, et keskmine sisetäite protsent annab vastupidavama tulemuse kui väike või suur sisetäite protsent. On ka näha, et suurim rakendunud jõud on korrelatsioonis joone tõusuga. Suuremale jõule vastu pidanud detailide puhul on kõvera tõus elastses piirkonnas järsem, mis näitab detaili suuremat jääkust. Esimese jääkuskatse tulemusel leiti, et kõige jäigem ja kõige suuremat jõudu taluva tulemuse antud detaili puhul annab detaili printimine 5 perimeetriga ja 40% sisetäitega.

Seejärel viidi katse tulemuste kinnitamiseks läbi korduskatse. Korduskatses mõõdeti veel kahe 5\_40 detaili jääkust, samuti 5\_30 ja 5\_50 detailide jääkust, et leida sisetäite koguse optimum suurema täpsusega. Katse viidi läbi sama mõõteseadme ja -rakisega nagu esimene jääkuskatse. Teise jääkuskatse tulemusi kujutab Joonis 27.



Joonis 27. Teise jäikuskatse tulemused 5 perimeetri ning 30%, 40% ja 50% sisetäitega detailidega

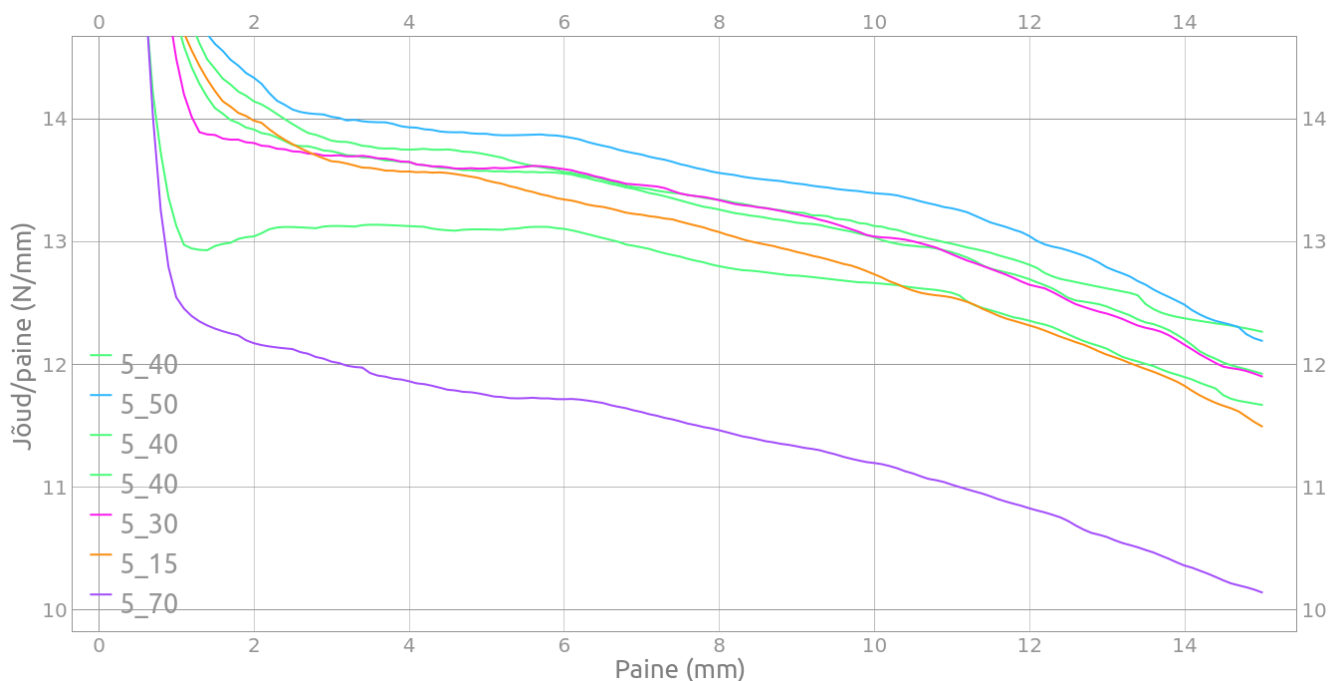
Joonis 27 näitab, et 5 perimeetri puhul annavad 30—50% sisetäited sarnase jäikuse. On ka näha, et kaks uut 5\_40 detaili, millega sooritati täiendavad mõõtmised, saavutasid omavahel sarnased tulemused, mis näitab tulemuste korratavust. On näha, et suurema sisetäite protsendi puhul peab detail enne murdumist vastu suuremale paindele. Selline painde ulatus ei ole aga Robotondi kontekstis realistlik, mistõttu ei ole see omadus sobiva sisetäite ja perimeetrite koguse kombinatsiooni valikul oluline.



Joonis 28. Esimese ja teise jäikuskatse tulemused kombineeritult

Mõlema katse tulemusi koos kujutab [Joonis 28](#). Tulemustest on näha, et 1. katses oli 5\_40 detailile rakendunud maksimaalne jõud suurem kui 2. katses 5\_50 detaili puhul. Kuna detailide komplektide identset keskkonda enne mõõtmisi ei olnud võimalik tagada, võivad mõõtetulemusi peidetud faktoritena mõjutada detailide hoidmise keskkonna suhteline õhuniiskus ja temperatuur.

Jõu-deformatsiooni kõverate lineaarne osa näitab elastse deformatsiooni piirkonda, mille suurust on Robotondi vastupidavuse hindamiseks ja optimaalsete parameetrite valikuks oluline teada. Piirkonna suuruse määramiseks saab leida jõu ja painde suhte; paindevahemik, kus suhe on konstantne, ongi elastse deformatsiooni piirkond. 5 perimeetriga detailide jõu ja painde suhet paindevahemikus 0–15 mm näitab [Joonis 29](#).

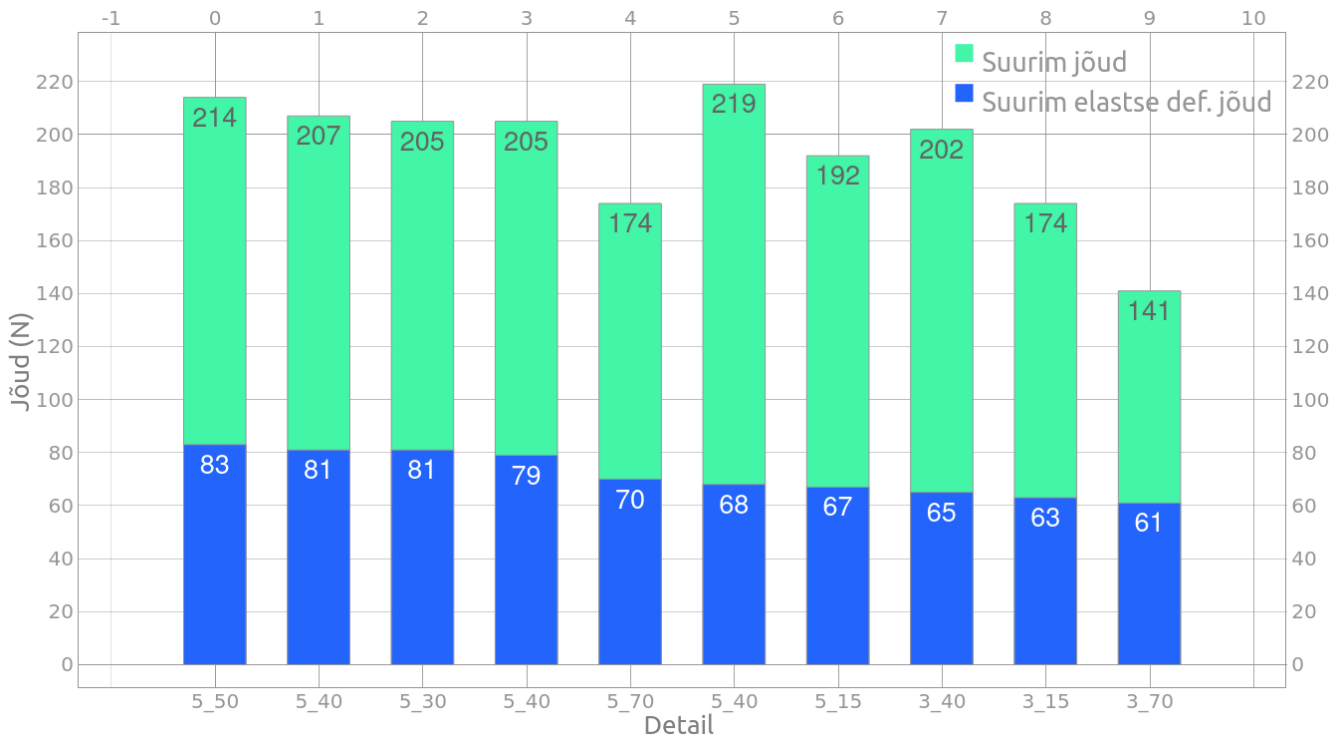


*Joonis 29. Jõu ja painde suhe 5 perimeetriga detailide paindevahemikus 0–15 mm*

Jooniselt on näha, et enamiku detailide puhul hakkab jõu ja painde suhe järsemalt langema, kui paine ületab 6 mm. Järsk langus, mis toimub paindevahemikus 0–1 mm, tuleneb jagamisest ühest väiksema arvuga. Kuni ca 6 mm suuruse paindeni püsib suhe 30–50% sisetäitega detailide puhul peaaegu muutumatuna. 15% ja 70% sisetäitega detailide puhul langeb suhe veidi rohkem, kuid erinevus ei ole siiski tugev. Tulemustest saab järeldada, et testdetailide elastne deformatsioon toimub paindepiirkonnas 0–6 mm. Suurema painde puhul ei ole deformatsioon enam elastne, vaid plastne ehk püsiv.

Katse tulemustest nähtub ka, et elastse deformatsiooni piirkonna suurus ei sõltu olulisel määral sisetäite protsendist. Küll aga sõltub sisetäite protsendist selle jõu suurus, mille rakendumisel läheb elastne deformatsioon üle plastseks deformatsiooniks. Kõigile detailidele rakendunud suurimat jõudu ja elastse

deformatsiooni piirkonnas rakendunud suurimat jõudu kujutab Joonis 30. 6 mm suuruse painde saavutas 5\_50 detail 83 N suuruse jõu mõjul. 5\_40 detailidel oli vastav jõud vaid veidi väiksem.



Joonis 30. Detailidele rakendunud suurim jõud (tähistatud rohelisega) ja elastse deformatsiooni piirkonna suurim jõud (tähistatud sinisega). Tulemused on sorteeritud suurima elastse deformatsiooni jõu järgi.

5 perimeetriga detailid on märgatavalt jäigemad kui 3 perimeetriga detailid. 5\_40 ja 5\_50 detailide jäikuse erinevus on aga väike. Samas vaikesätetega printimisel tõuseb kogu roboti printiaeg iga 10% sisetäite lisandumisel 2 h ning võib eeldada, et kohandatud sätetega printimisel jääb see aeg samasse suurusjärku. Seetõttu valiti kere printimiseks 5 perimeetri ja 40% sisetäite kombinatsioon.

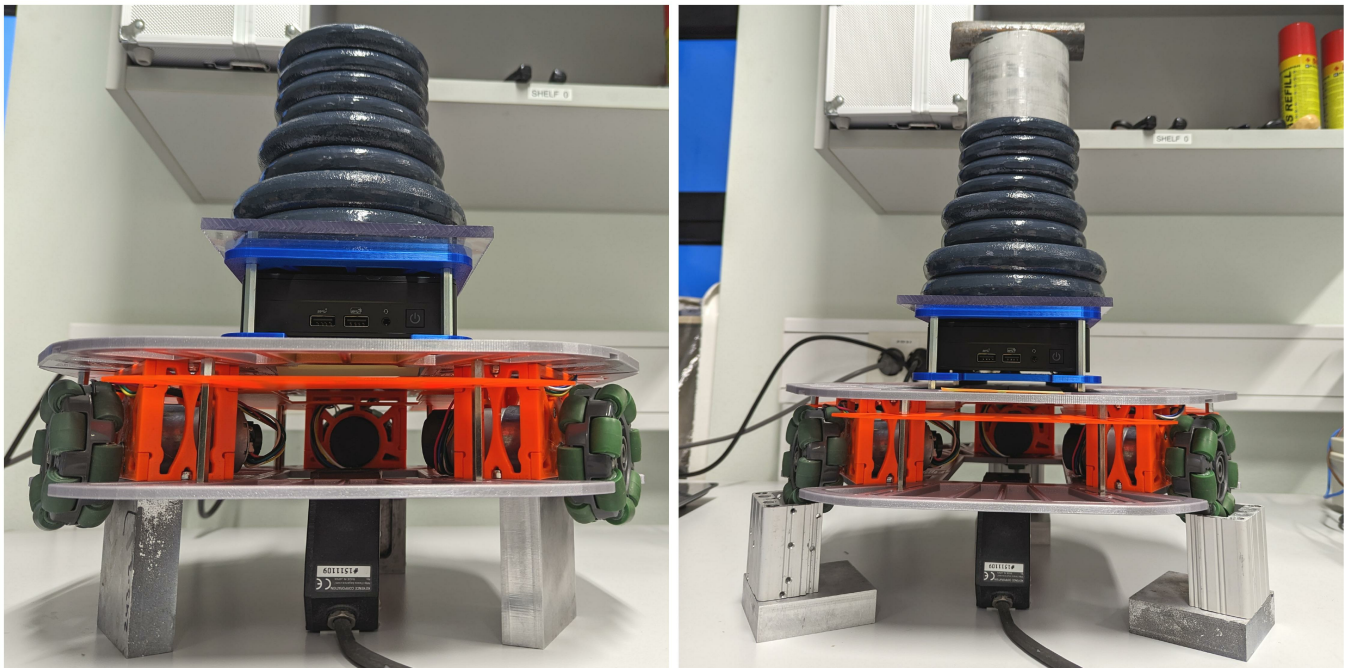
Järgnevalt on toodud 5 perimeetri ja 40% sisetäitega prinditud detailidest koostatud kere painde- ja löögikindluse analüüs.

## 5.7. Kere tugevusanalüüs

Kere tugevuse hindamiseks viidi läbi kahte tüüpi katseid. Kere jäikuse analüüsimiseks asetati kerele koormus ning mõõdeti selle mõjul keres tekkiva painde suurust. Seejärel hinnati ka painde muutumist ja püsivust ajas. Kere löögikindluse analüüsimiseks viidi läbi simuleeritud kokkupõrgete katse ja uuriti, kas kokkupõrked põhjustavad plastset deformatsiooni.

### 5.7.1. Läbipainde analüüs

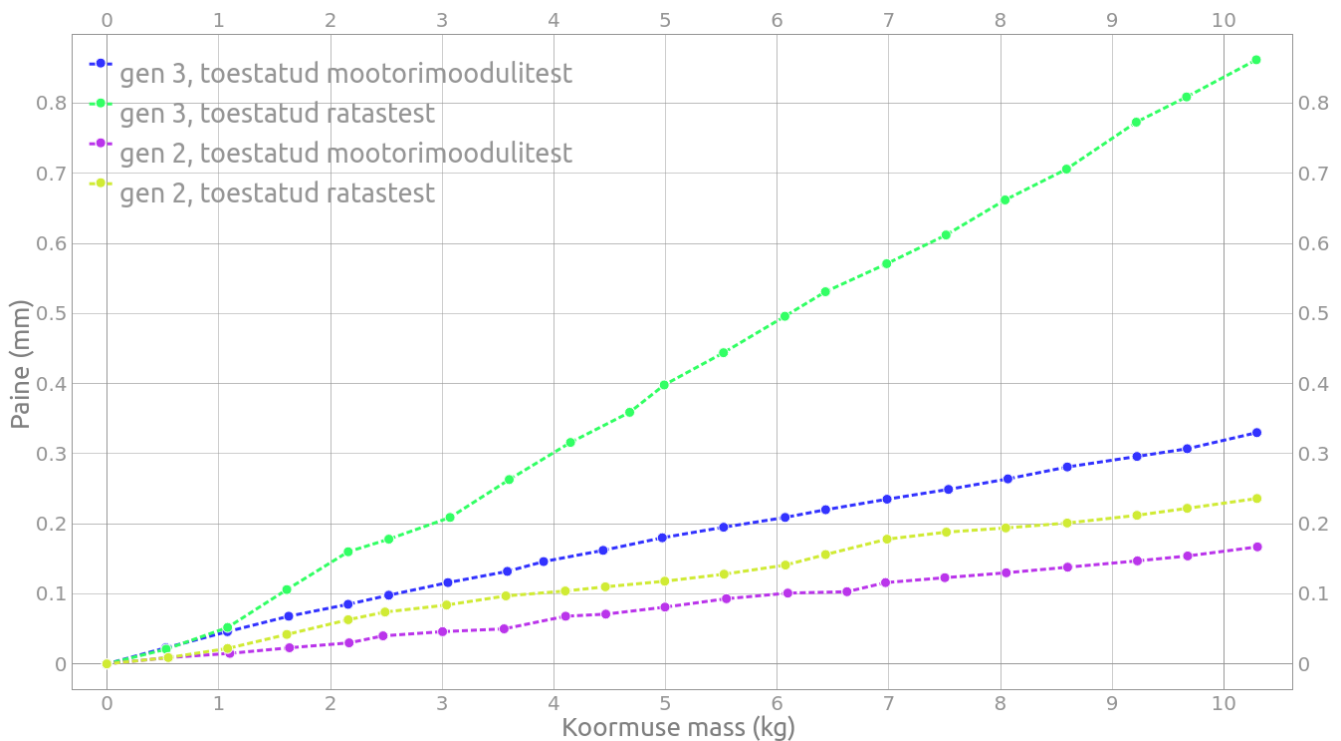
Kere läbipainde suuruse leidmiseks kere peale erineva massi asetamisel viidi läbi kaks paindekatset. Esimese katse jaoks toestati kere mootorimoodulite alt alumiiniumist risttahukatega selliselt, et tugede servad olid kohakuti raamimooduli alumise plaadi serva ja mootorimooduli esiküljega. Teise katse jaoks toestati kere rataste alt nii, et omniliikuvad rattad toetusid kummist rullikute vahelistest punktidest alumiiniumprofiilist tugele, mis omakorda paiknesid alumiiniumist risttahukate peal. Paine suuruse mõõtmiseks kasutati kauguse mõõtmise laserit Keyence LK-G82 [108], mille korratavus on 0,2 µm. Laser paigutati tugele asetatud kere alla nõnda, et laserikiir tabas pardaarvuti põhja läbi arvutimooduli alumise plaadi keskel oleva nelinurkse ava. Laser fikseeriti stabiilsuse tagamiseks laua külge. Kere paigutust tugele mõlema katse puhul näitab [Joonis 31](#).



*Joonis 31. Kere läbipainde mõõtmise katsed, kus kere on toetatud mootorimoodulite alt (vasakul) ja rataste alt (paremal)*

Läbipainde mõõtmiseks asetati esmalt arvutimooduli peale koormust jaotav polükarbonaadist plaat, sest kasutatavad kaaluvihid olid mõõtmelt arvutimooduli tugipukside vahedest väiksemad. Plaat lisati selleks, et paremini simuleerida reaalelulist lisaseadme kandmise olukorda, kus seade paigutatakse toetuma tugipuksidele. Seejärel asetati koormust jaotava plaadi peale kaaluvihte vahemikus 0—10 kg sammuga ~0,5 kg. Kõik kasutatatud kaaluvihid kaaluti eelnevalt. Kaaluvihtide paigutust Robotondi peal näitab samuti [Joonis 31](#).

Kirjeldatud katsed viidi võrdluseks läbi ka Robotont gen 2-ga. Katsete koondatud tulemusi kujutab [Joonis 32](#).



Joonis 32. Robotondi kere (ver0.2.0) läbipaine 0—10 kg massiga kaaluvihvide mõjul, toestatuna mootorimoodulite alt ja rataste alt. Võrdluseks on toodud gen 2-ga läbiviidud samade katsete tulemused.

Tulemustest on näha, et mootorimoodulite alt toestatud gen 3 kere läbipaine 10,3 kg suuruse massi mõjul on 0,33 mm. Polükarbonaadist gen 2 kere paine sama massi mõjul on 0,17 mm ehk kaks korda väiksem. Kui kere on toestatud ratastest nagu roboti kasutamise käigus, on vastav paine gen 3 kere puhul 0,86 mm ja gen 2 kere puhul 0,24 mm.

Tulemustest on selgelt näha, et gen 3 keres esineb ratastest toestamise korral suurem läbipaine kui gen 2 puhul. Üks võimalik selgitus sellele on, et 3D-prinditud detailid painduvad rohkem kui polükarbonaadist detailid. Kuna aga mootorimoodulitest toestamisel sellist erinevust ei esine, on tõenäoline, et mootorite kinnituses esineb gen 3 kere puhul suurem lõtk ning ratastest toestamisel nähtav paine tuleneb mootorite kergest nihkumisest koormamise korral. Selgelt on aga näha, et Robotondi kere painde suurim faktor ei ole mitte keredetailide läbipaine, vaid hoopis ratastest või mootoritest tulenev peidetud faktor.

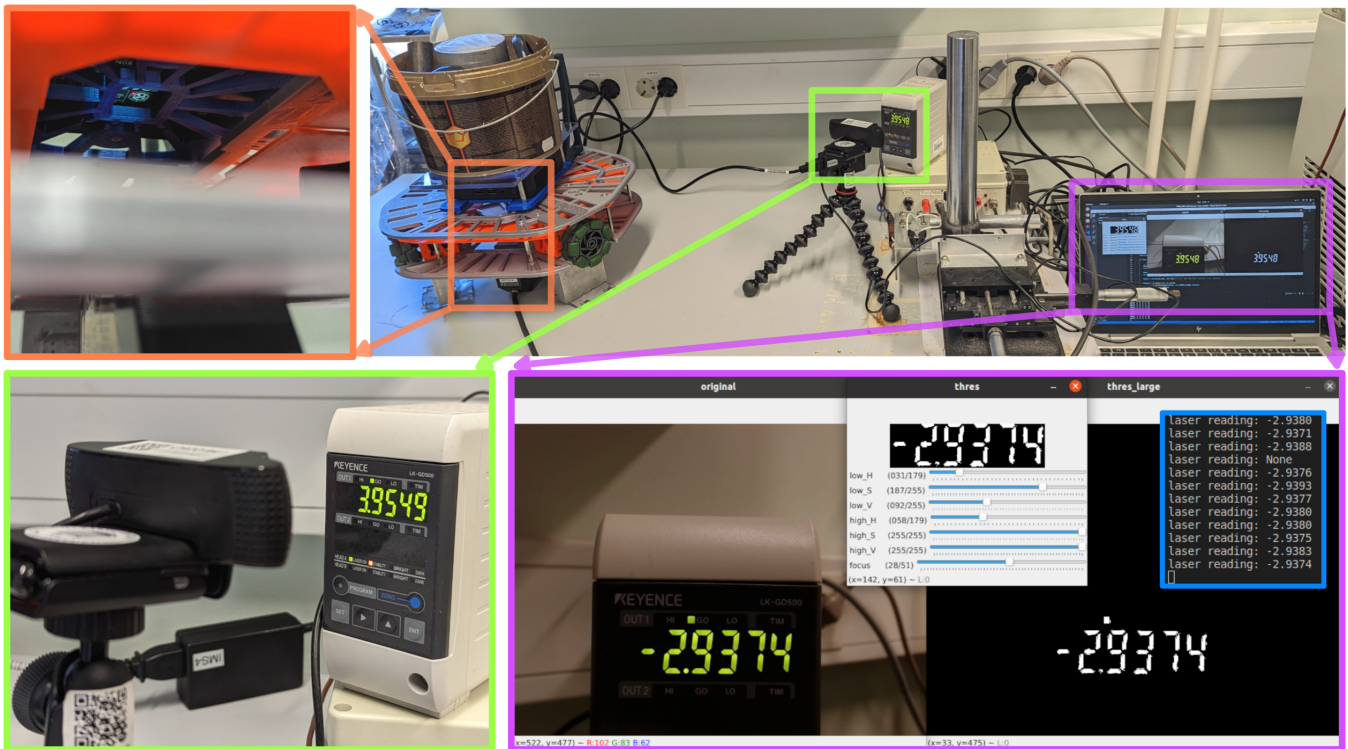
Kuigi ühe detailiga läbiviidud paindekatsed ja terve robotikere puhul on mehaaniliste pingete jaotus erinev, on detailiga tehtud katsete tulemuste põhjal võimalik teha järeldusi ka terve kere kohta. Kere kõige painduvamad osad on just raamimooduli detailid, kuna nende pindala ja paksuse suhe on kõige suurem. Terve kerega läbiviidud katsete tulemustest nähtub, et kuigi 3D-prinditud gen 3 kere paindub rohkem kui polükarbonaadist gen 2 kere, jääb paine siiski tugevalt alla ühe detaili plastse deformatsiooni piiri (6 mm). Plastse deformatsiooni puudumist kinnitab ka painde lineaarsus 0—10 kg suuruse massiga

koormamisel.

Lisaks lühiajalisel koormamisel plastse deformatsiooni puudumisele on aga oluline, et plastset deformatsiooni ei tekiks ka pikemaajalisel koormamisel. Järgnevalt ongi toodud selleteemaline analüüs.

### 5.7.2. Painde püsivuse analüüs

Painde püsivuse analüüsimiseks tehti kaks katset. Mõlema katse jaoks toestati kere mootorimoodulite alt sarnaselt eelmises katses kirjeldatule ja mõõdeti kere kaugust laserist. Kuna mõõtelaseriga ei õnnestunud liidestuda, kirjutati laseri mõõtetulemuste hõivamiseks masinnägemisel põhinev Pythoni skript (Lisa 1). Katse ülesseadet näitab Joonis 33.



Joonis 33. Painde püsivuse katse ülesseade (ülemine parempoolne pilt), kus vasakul on näha alumiiniumist tugelele asetatud Robotondi keret, mille peal on 10,4 kg massiga kaaluvihid. Kere all on mõõtelaser (suurendatud oranžiga näidatud pildil). Keskel on laseri näidik ja seda tuvastav kaamera (suurendatud rohelisega näidatud pildil). Paremalt on kaamerapilti töötlev arvuti (suurendatud lillaga näidatud pildil). Lillaga näidatud pildil on kuvatud lävendatud kaamerapilt ja eraldi selle huvipakkuv ala. Sinisega ümbritsetult on kuvatud käsurea väljundit, kuhu kirjutati tuvastatud numbrid.

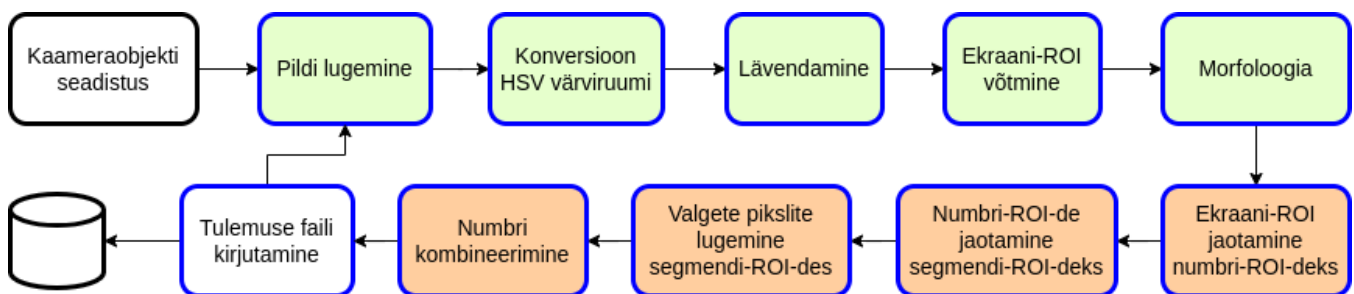
Laseri mõõtetulemuste tuvastamiseks kirjutatud skriptis saab valida kahe töörežiimi vahel. Seadistamiseks ja testimiseks mõeldud test režiimis loeb programm sisse ühe testpildi, mille näitel saab kasutaja interaktiivse graafilise liidese kaudu seadistada pildi lävendamiseks sobilikud värviruumi kanalite vahemikud. Graafilises liideses muudetud väärtused salvestatakse faili ja programmi

taaskäivitamisel loetakse failist. See tagab, et kasutaja valitud seadistus säilib ka programmi sulgemisel. Kaamera andmevoo töötlemiseks on programmil `stream` režiim, kus sagedusega 1 Hz võetakse uus kaader, millel rakendatakse sama pilditöötamise protsessi nagu ka `test` režiimis ehk kasutaja saab vajadusel jooksvalt parameetreid korrigeerida.

Skripti korrektse kasutamise korral on pilditöötamise protsessi (vt [Joonis 34](#)) sisendiks kaamerapilt, kus on näha laseri ekraani, mis koosneb kuuest 7-segmendilisest LED-ist. Kaamerapilt viiakse värvituvastuse hõlbustamiseks HSV (*Hue, Saturation, Value*) värviruumi ning lävendatakse seejärel kasutaja seadistatud väärtuste vahemikus. Lävendatud pildilt leitakse valgeid pikseleid sisaldav ekraani-ROI (huvipakkuv ala, ingl *region of interest*), mis jaotatakse kuueks numbri-ROI-ks, millest igaühel on üks 7-segmendiline LED. Numbrite paremaks tuvastamiseks rakendatakse ekraani-ROI-l morfoloogilisi operatsioone.

Iga numbri-ROI jaotatakse seitsmeks segmendi-ROI-ks, millest igaüks hõlmab 7-segmendilise LED-i ühte komponenti. Seejärel tuvastatakse valgete ja mustade pikslite suhte järgi igas segmendi-ROI-s, kas selle ala LED põleb või mitte. Kombineerides kõik põlevad LED-id ühe 7-segmendilise LED-i piires tuvastatakse konkreetse 7-segmendilise LED-iga kuvatav number. Selliselt tuvastatakse kõik kuus 7-segmendiliste LED-idega kuvatud numbrit, mis koos moodustavadki laseri mõõtetulemuse. Laseri ekraanilt tuvastatakse kaamera abil laseri lugemist sagedusega 1 Hz ning mõõtetulemused salvestatakse tekstifaili, mille põhjal saab teha edasist andmetöötlust.

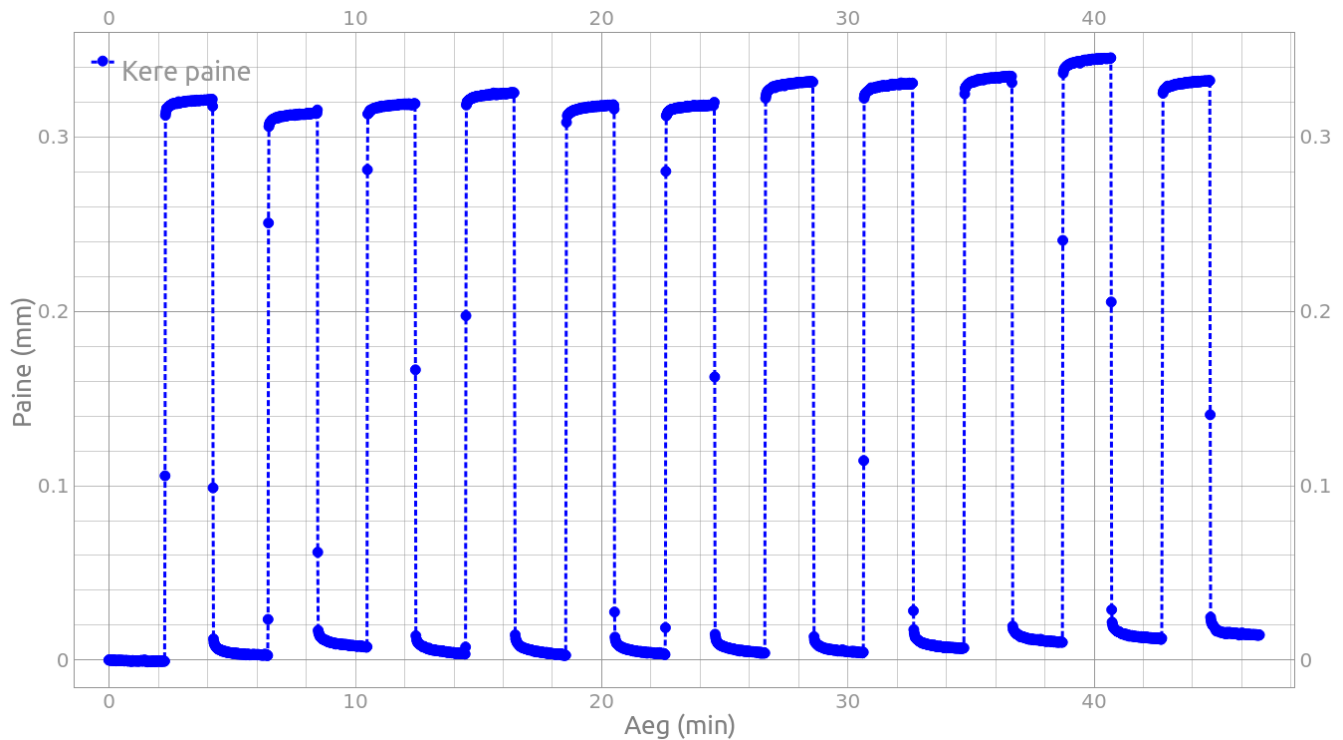
Sümbolid, mis ei ole tuvastatavad numbrina, jäetakse kõrvale kui valemõõtmised. Kõigi katsete lõikes oli selliseid mõõtmisi keskmiselt 3,4%.



*Joonis 34. Laseri ekraani lugemise programmi pilditöötamise protsessi skeem. Sinise raamiga on märgitud tsükliliselt sagedusega 1 Hz toimuvad sammud. Rohelise taustaga on tähistatud ettevalmistavad pilditöötamise sammud. Oranži taustaga on tähistatud sammud, kus tegeletakse arvutuvastusega.*

Esimeses painde püsivuse katses asetati kere peale kaheks minutiks 10,4 kg massiga kaaluvihid, mis seejärel eemaldati samuti kaheks minutiks. Sellised 4-minutilisi mõõtetetsükleid viidi läbi 11. Katse eesmärk oli leida, kas kere lühiajalisel koormamisel tekib plastne deformatsioon. Enne mõõtmiste

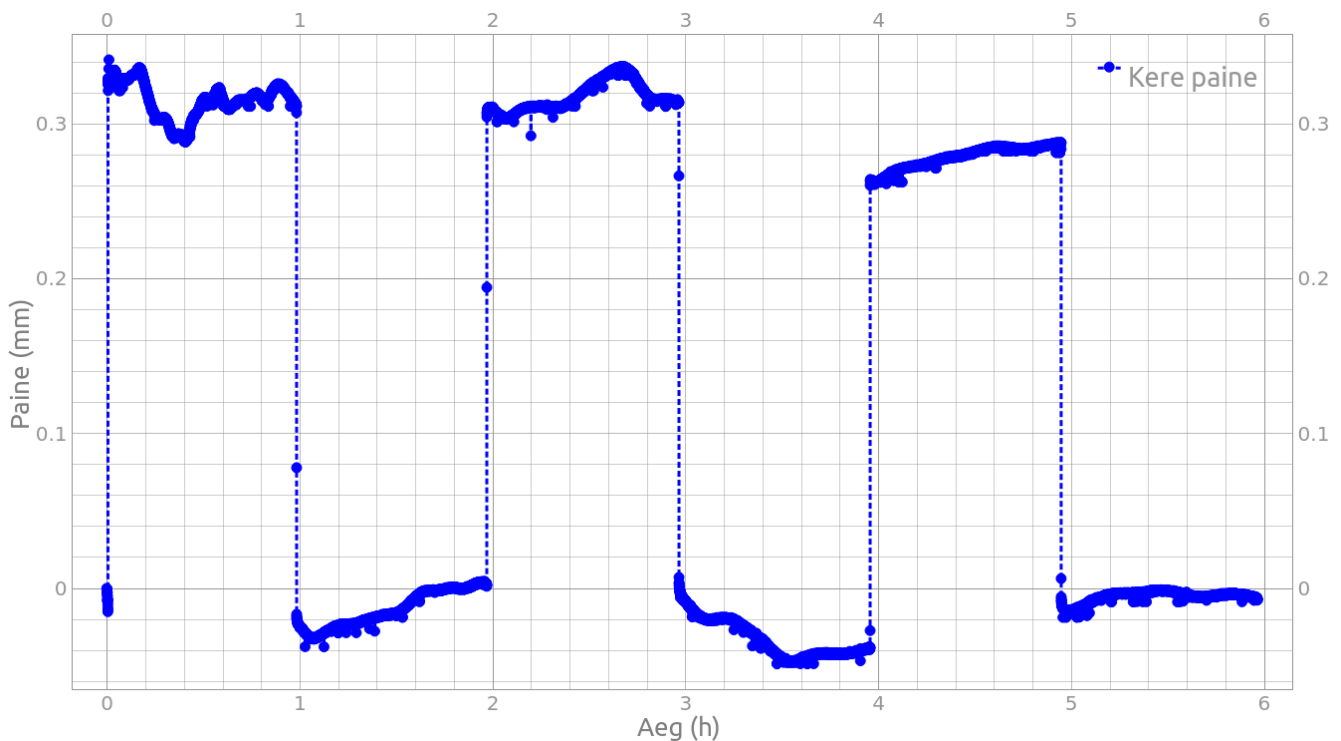
alustamist asetati kaaluvihid lühiajaliselt kere peale ja eemaldati, et vähendada keres esineda võivate juhuslike lõtkude mõju mõõtetulemustele. Esimese katse tulemusi kujutab Joonis 35.



Joonis 35. Robotondi kere (ver0.2.0) läbipaine 0 kg (paine 0 mm kandis) ja 10,4 kg (paine 0,3 mm kandis) massiga kaaluvihide mõjul 11 4-minutilise mõõtettsükli jooksul

Katse tulemusest on näha, et koormamise ajal esinev paine varieerub ebahühtlaselt. Siiski jääb sama koormuse korral painde suurus sarnaseks, varieerudes 0,31—0,34 mm vahel. Alates 9. mõõtettsüklist säilib keres väike paine ka koormuse eemaldamisel ehk esineb väike voolavus. Ühegi mõõtettsükli puhul ei ületanud aga pärast kaaluvihide eemaldamist kahe minuti jooksul säilinud paine 0,02 mm. See paine on Robotondi mõõtmete juures tähtsusetu, ei ole visuaalselt märgatav ega mõjuta roboti kasutamist.

Teises painde püsivuse katses uuriti edasi esimeses katses tuvastatud väikese voolavuse omadusi. Selle jaoks pikendati mõõteperioodi kahe tunni. 10,4 kg massiga kaaluvihid asetati kere peale üheks tunniks, seejärel eemaldati üheks tunniks. Selliselt läbiti kolm mõõtettsükli. Katse tulemusi kujutab Joonis 36.



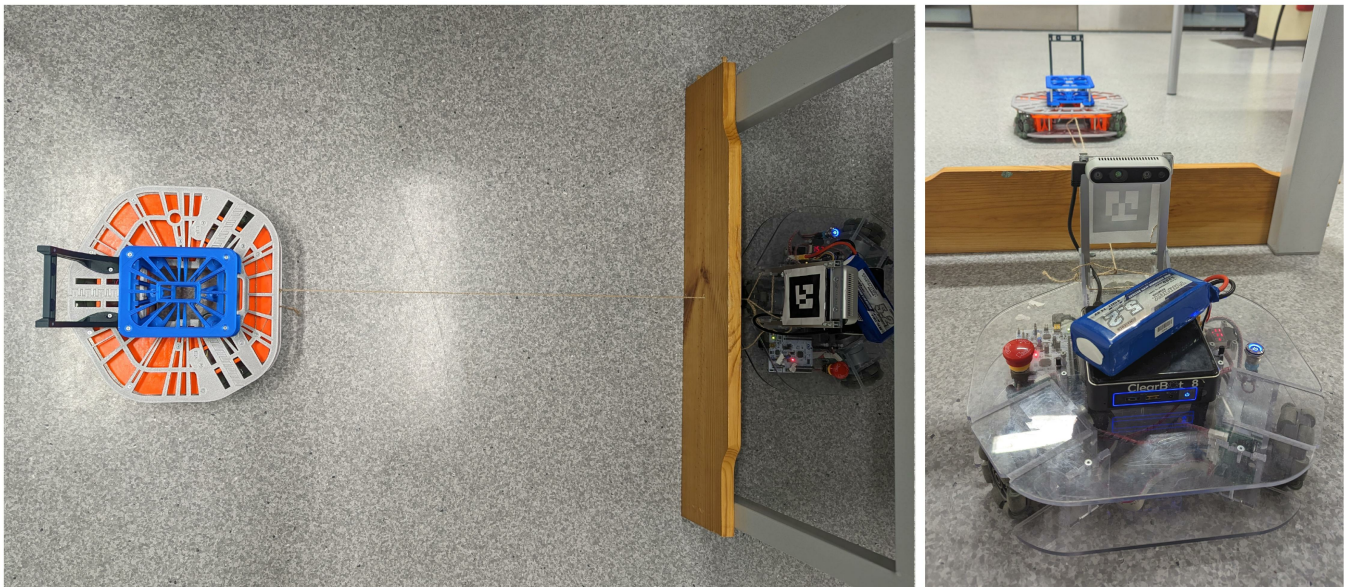
Joonis 36. Robotondi kere (ver0.2.0) läbipaine 0 kg (paine 0 mm kandis) ja 10,4 kg (paine 0,3 mm kandis) massiga kaaluvihtide mõjul kolme 2-tunnise mõõtetsükli jooksul

Katse tulemustest ilmnes, et kuigi mõõtetulemused näitavad kerget ebahütlust mõõtetsükli vahel, taastub süsteem koormuse eemaldamisel esialgse positsioonini. Kerge kõikumine painde suuruses võib tuleneda ka keskkonna vibratsioonidest. Maksimaalne kõikumise ulatus oli 0,06 mm, mis on ebaolulise suurusega. Olulist jääkpainet ei esine, seega ei teki keres 10,4 kg suuruse massiga tunni vältel koormamisel märgatavat plastset deformatsiooni.

Kuigi keres ei esine kerele asetatud koormuse mõjul märgatavat plastset deformatsiooni, on oluline ka, et seda ei tekiks järskude löökide korral. Järgnevalt ongi toodud kere löögikindluse analüüsi tulemused.

### 5.7.3. Löögikindluse analüüs

Robotondi õppetöös kasutamisel esineb sageli kokkupõrkeid teiste robotite, seinte ja mööbliga. Seetõttu on oluline, et loodud kere peaks tavakasutuse tingimustel toimuvatele kokkupõrgetele vastu ilma deformeerumiseta. Kere löögikindluse analüüsimiseks viidi läbi katse, kus ilma elektroonikata kere kokkupõrget vertikaalpinnaga simuleeriti gen 2 abil. Gen 3 elektroonika ei olnud katse läbiviimise ajaks veel valminud, mistõttu ei olnud võimalik gen 3-ga ilma gen 2 abita kokkupõrkeid sooritada. Seepärast kinnitati elektroonikata kere nõõri abil gen 2 külge selliselt, et nõõr läbis kahe roboti vahele fikseeritud vertikaalset takistust. Katse ülesseadet kujutab Joonis 37.



Joonis 37. Löögikindluse katse ülesseade. Gen3.0.0-ver0.2.0 ilma elektroonikata kere on kinnitatud gen 2 külge, mis veab gen 3 kere vastu vertikaalset takistust.

Katse simuleerib tavalise kasutamise käigus seinaga kokkupõrget, mida praktikas juhtub sageli. Tavakasutuses on Robotondi kiiruse limiidiks roboti põhivara (ingl *firmware*) tasandil seatud 0,3 m/s. Maksimaalse ressursikasutuse juures on võimalik saavutada Robotondiga kiirus 1 m/s. Katse jaoks laeti gen 2-le põhivara, kus kiiruseliimidiks oli seatud 1 m/s.

Gen 2-ga keret vedades saavutati sel meetodil kiirused 0,1 m/s, 0,25 m/s, 0,33 m/s ja 0,5 m/s. Iga kiirusega sooritati viis kokkupõrget. Mitte ühegi kokkupõrke tagajärjel ei tuvastatud gen 3 keres deformatsiooni. Seega on 3D-prinditud kere ka löögikindluse poolest sobilik õppetöös kasutamiseks.

Eelnevalt kirjeldati moodulite arendust ning prindisätete optimeerimise- ja kogu kere tugevusanalüüsi. Järgnevalt on kirjeldatud keredetailide 3D-printimise protsessi, kus rakendatakse analüüsi tulemusel valitud prindisätteid.

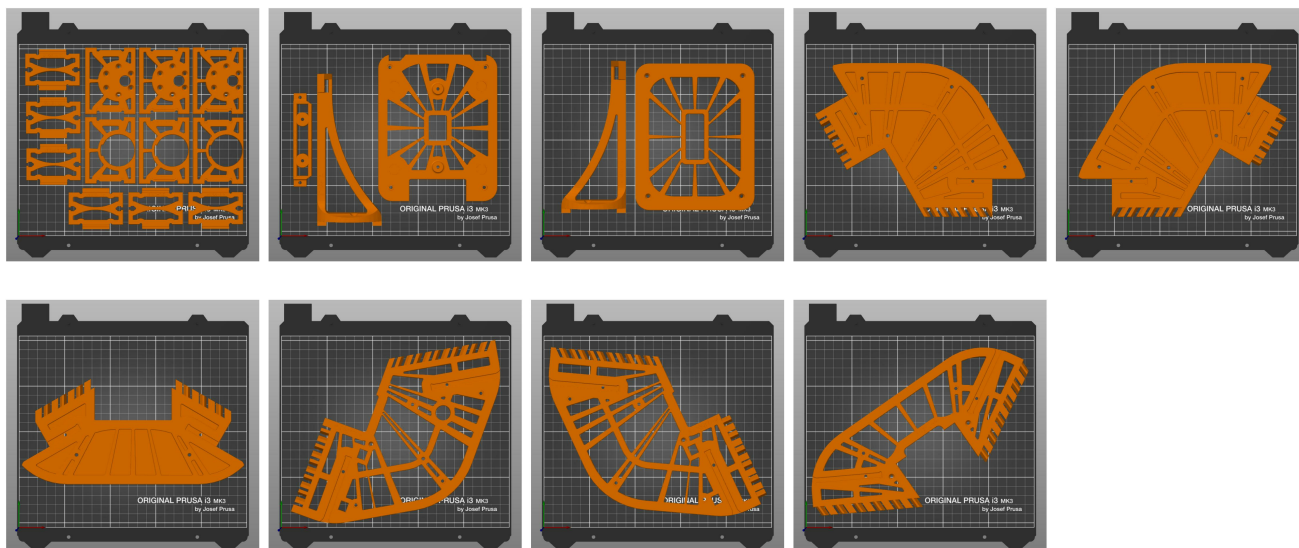
## 5.8. Printimine

Prinditud keredetaile on kokku 23. Selleks, et minimeerida kõigi detailide printimisele kuluvat aega, on oluline paigutada detailid printimisalale optimaalselt. Printimiseks kuluv aeg ei sõltu oluliselt sellest, kas detaile prinditakse ühe- või mitmekaupa, küll aga sõltub sellest ettevalmistuste ja järeltegevuste koguaeg. Iga printimise vahel on vaja printimisala puhastada, printimine uuesti käivitada ja printer soojendada. Seetõttu on optimaalne teha võimalikult vähe printe, et minimeerida kasutaja ajakulu. Optimeerides detailide paigutust printimisalal on võimalik printide kogust vähendada 9-ni. Üht võimalikku detailide jaotust printimisalal ja vastavaid aja- ja materjalikuluseid näitab Tabel 7.

Tabel 7. Robotont gen3.0.0-ver1.0.0 detailide printimiseks grupeerimine

Grupi nr	Grupis olevad detailid (detaili versiooninumber)	Printimisaeg	Filamendi- kulu (g)
1.	Mootorimooduli esimene (1.4), tagumine (1.4) ja külg (1.5)	10 h 4 min	125
2.	Arvutimooduli alumine (1.3), kaameramooduli parem (1.3) ja kaameratagune (1.4)	7 h 0 min	101
3.	Arvutimooduli ülemine (1.2), kaameramooduli vasak (1.3)	5 h 42 min	86
4.	Raamimooduli alumine vasak (1.4)	5 h 27 min	77
5.	Raamimooduli alumine parem (1.4)	5 h 30 min	77
6.	Raamimooduli alumine esimene (1.5)	4 h 11 min	61
7.	Raamimooduli ülemine vasak (1.5)	5 h 41 min	81
8.	Raamimooduli ülemine parem (1.5)	5 h 34 min	79
9.	Raamimooduli ülemine esimene (1.4)	4 h 43 min	67
<b>Kokku</b>	<b>Kogu kere (gen3.0.0-ver1.0.0)</b>	<b>53 h 52 min</b>	<b>754</b>

Detailid grupeeriti selliselt, et PETG-st prinditavad mootorimoodulite detailid saaksid printitud ühe prindiga. Ülejäänud detailide kombinatsioonid valiti selle järgi, et soovi korral oleks võimalik raamimoodul printida kaamera- ja arvutimoodulist erinevat värvi filamendiga. Kõiki detaile PrusaSliceris printimisalale paigutatuna näitab [Joonis 38](#).



Joonis 38. Keredetailide (ver1.0.0) paigutus printimisalale

Detailide vastupidavusele optimeeritud seadetega ja optimaalse detailide paigutusega võtab kõigi detailide printimine aega 53 h 52 min ja selleks kulub 754 g filamenti. Filamendikogusest 629 g on PLA raami-, arvuti- ja kaameramooduli printimiseks; 125 g on PETG mootorimoodulite printimiseks. Võrreldes summaarset aega ja materjalikulu detailide ühekaupa printimisel ([Lisa 3](#)) ja gruppide printimisel ([Tabel 7](#)) on näha, et gruppide printimine hoiab kokku 1 g filamenti ja 7 min printiaega. Väike filamendikulu erinevus tuleneb sellest, et ühekaupa printimisel prinditakse printimisala piirjoont näitav rada iga detaili puhul eraldi, detailide grupeerimisel aga ainult ümber gruppide. Prindiaja erinevus tuleneb peamiselt printeri kalibreerimisaja kokkuhoiust, sest iga prindi puhul kalibreerib printer ennast uuesti. Peamine gruppide printimise kasu seisneb aga siiski kasutaja aja kokkuhoius. Keskmiselt kulub ühe prindi alustamiseks, printeri töö korrektse käivitumises veendumiseks ja printimisala prindijärgseks puhastamiseks 10–20 minutit. Eeldusel, et iga prindi jaoks kulub kasutajal 20 minutit, kulub 9 prindigrupi printimiseks kasutaja aega 3 h, eraldi 23 detaili printimiseks kuluks aga 7 h 40 min.

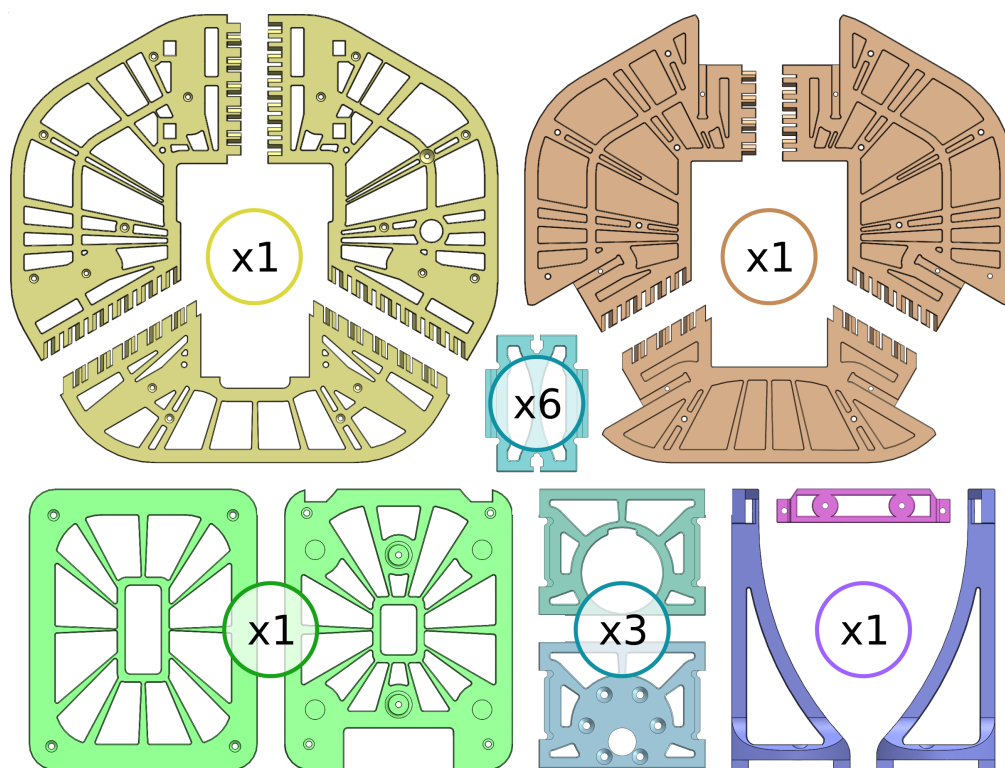
Printimisgruppide printimiseks kasutati käesoleva töö raames välja töötatud printeriseadete kombinatsiooni. Tagamaks optimaalse tasakaalu detaili vastupidavuse, massi ja prindiaja vahel, prinditi detailid 5 perimeetri ja 40% sisetäitega. Lisaks optimeeriti veel mitmeid vähem olulisi seadeid, nagu erinevate prindiosade printimise kiirused. Täielik ülevaade kasutatud printeriseadetest on leitav `.3mf` formaadis viilutamistarkvara projektifailidest, mis asuvad [Lisa 2](#).

Kõik Robotondi 3D-printimiseks ja edasiarenduseks vajalikud failid on tehtud avalikult kättesaadavaks Githubi repositooriumis. Repositooriumis on leitavad CAD mudelid `.step` formaadis, mis sobib kasutamiseks enamikus CAD tarkvarades. Prindigruppide failid on Prusa i3 MK3S+ printeriga otse printimiseks lisatud `.gcode` formaadis ja prindisätete muutmiseks `.3mf` formaadis. Teiste viilutamistarkvaradega kasutamiseks on lisatud ka `.stl` failid. Disaini- ja tootmisfailid asuvad [Lisa 2](#).

Pärast keredetailide 3D-printimist on veel vaja läbida keredetailide kokkupanemise etapp. Järgnevalt ongi kirjeldatud, kuidas prinditud detailidest koostada Robotont.

## 5.9. Koostamine

Kere koosneb 23 prinditud detailist, millest keremoodulis paiknevad 6, arvutimoodulis 2, kaameramoodulis 3 ja kolmes mootorimoodulis kokku 12. Robotondi kokkupanemiseks vajalike 3D-prinditud keredetailide koguseid näitab [Joonis 39](#).



Joonis 39. Robotont gen3.0.0-ver1.0.0 kokkupanemiseks vajalike 3D-prinditud detailide kogused. Kollasega on tähistatud raamimooduli ülemine osa, pruuniga raamimooduli alumine osa, rohelisega arvutimoodul, sinisega mootorimoodul, lilla ja roosaga kaameramoodul.

Prinditud detailide omavahel fikseerimiseks vajalikke kinnitusvahendeid ja nende koguseid koondab Tabel 8.

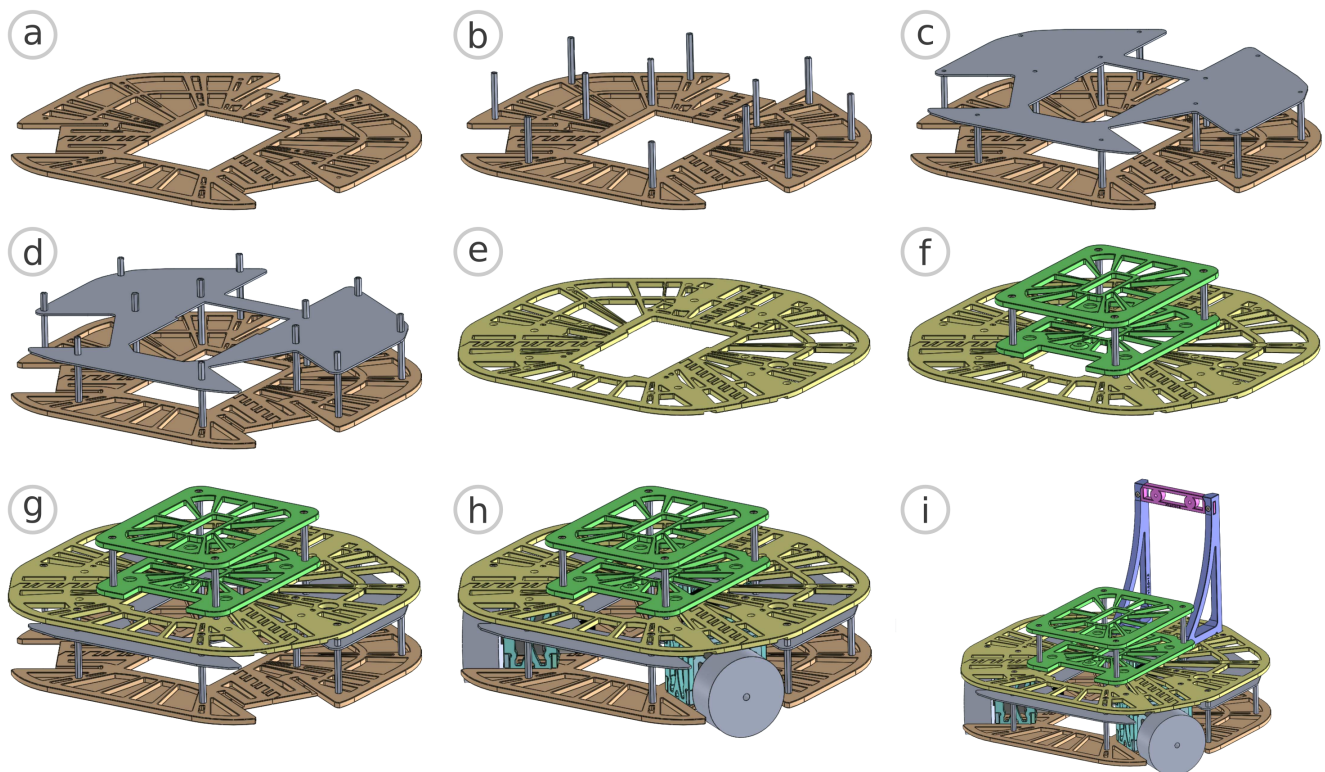
Tabel 8. Robotont gen 3 kere kinnitusvahendid

		Raamimoodul	Mootorimoodulid	Arvutimoodul	Kaameramoodul	Kokku
Poldid	M3x6	-	-	2	-	2
	M3x8	22	28	6	-	56
	M3x16	-	-	-	4	4
Mutrid	M3	-	-	-	2	2
	M3 lukustiga	-	12	-	-	12
Puksid	M3x6 MF	-	-	4	-	4
	M3x15 MF	12	-	-	-	12
	M3x40 FF	12	-	4	-	16

Kogu roboti kere koostamise protsess võttis käesoleva töö autoril aega ca 30 minutit ja oli üldiselt mugav. Kõikide poldiaukude puhul pöörati disainis tähelepanu sellele, et polt mahuks auku vabalt sisse, mis kiirendab kokkupanemise protsessi. Kasutati poldi ja mutri kinnitusi, mitte näiteks 3D-prinditavate detailide puhul tihti kasutatavat poltide ja detaili sisse sulatatud keermestatud sisendite lahendust, et minimeerida prindijärgsete tegevuste kogust ja hõlbustada kodukasutaja jaoks Robotondi kokkupanemist.

Kuna Robotondi kere puhul on oluline detailide õige tihedusega ist, muudab elevandijala tekkimine mitme detaili — näiteks raamimooduli detailide — kokkupanemise võimatuks. Elevandijalga on võimalik vähendada detaili alaservadesse 45-kraadise faasi lisamisega. Robotondi detailide jaoks sobiva faasisuuruse leidmiseks prinditi arenduse käigus välja testdetailid 0,25, 0,5, 0,75, 1,00 ja 1,25 mm faasidega. Leiti, et nii istude poolest kui ka visuaalselt parima tulemuse andis 0,5 mm suurune faas. Selline faas lisati kõigile detailidele nende printimisalaga kokkupuutuva pinna servadesse.

Koostamis- ja kasutusmugavuse jaoks lisati 0,5 mm suurused 45-kraadised faasid hiljem ka kõikidesse teistesse servadesse. Teravate servade puudumine vähendab kere vastuvõtlikkust mehaanilistele kahjustustele, mis rikuksid roboti visuaali. Samuti tekitab robot teravate servade puudumisel ka ise kokkupõrke käigus vähem kahjustusi. Kõikidesse sisenurkadesse lisati sobiva raadiusega ümarfaasid, mis parandavad visuaali ja suurendavad detailide murdumiskindlust.



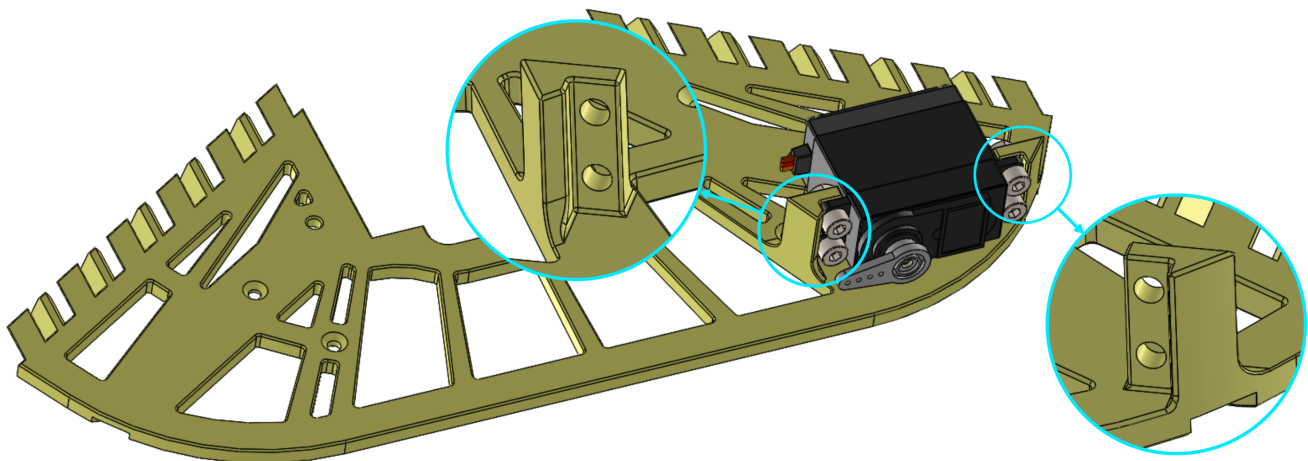
Joonis 40. Robotont gen3.0.0 kere koostamise sammud

Kere koostamise esimeses etapis pannakse kokku arvutimoodul, mootorimoodulid ja kaameramoodul eraldi. Seejärel alustatakse koostamist raamimooduli alumisest plaadist, kuhu lisatakse 40 mm puksid, trükkplaat ja 15 mm puksid (Joonis 40 a—d). Raamimooduli ülemise plaadi külge kinnitatakse arvutimoodul ning alles seejärel ühendatakse raamimooduli alamosad (Joonis 40 e—g). Valmis raamimoodulisse lisatakse mootorimoodulid ja kinnitatakse need raamimooduli külge (Joonis 40 h). Viimasena lisatakse kaameramoodul, mille poltide abil ühendatakse ka tagumine mootorimoodul raamimooduliga (Joonis 40 i).

## 5.10. Eriotstarbelised arendused

3D-printimine võimaldab kiirelt valmistada juurde uusi erifunktsionaalsusega keredetaile. Samuti on võimalikud palju keerulisemad geomeetriad kui CNC-freesimise puhul. Käesoleva töö raames valmis näidislahendus ühest võimalikust lisafunktsionaalsusest.

Selleks, et võimaldada Robotondi abil õppetöös läbi viia keskkonnaga interakteerumise ülesandeid, on kasulik lisada Robotondile väike servomootor. Selle jaoks loodi raamimooduli ülemise plaadi esidetail, millel on spetsiaalne pesa servo jaoks. Pesa mõõdud valiti TowerPro MG996R servo [119] järgi. Raamimooduli servopesa detaili kujutab Joonis 41. Servopesa toed on disainitud L-kujulisena, et tagada nende parem vastupanuvõime murdumisele.



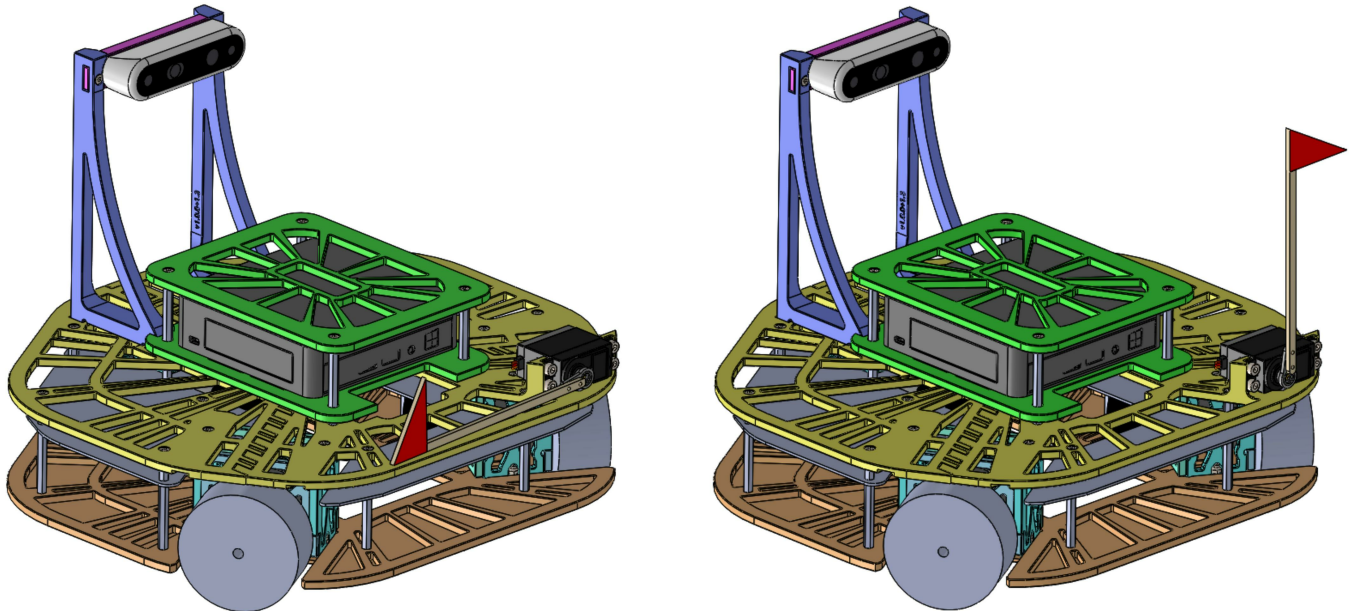
Joonis 41. Raamimooduli ülemise plaadi servopesa detail (ver1.0.0+2.0). Siniste ringidega on tähistatud servopesa toed ilma servota. Visualiseerimiseks kasutatud servo mudel pärineb avalikust GrabCAD-i keskkonnast [120].

Servo abil robotile täiendava funktsionaalsuse lisamiseks on vajalik asendada ainult raamimooduli ülemise plaadi esidetail. Selle CNC-freesimisest tellimine oleks kulukas ja detaili kättesaamine võtaks mitu päeva. 3D-printides on aga võimalik lisafunktsionaalsus kasutusele võtta kiiresti. Loomulikult oleks

võimalik lisada servo ka standardse detaili külge, kuid mitte ilma detaili või roboti esteetilist välimust kahjustamata.

Servopesaga detaili printimine teiste detailidega samade printerisätetega võtab aega 5 h 13 min ja materjali kulub 70 g. Võrreldes ilma servopesata sama detailiga kulub selle printimiseks 30 minutit ja 3 g materjali rohkem. Erinevalt baasmudeli detailidest on sellise lisafunktsionaalsusega detaili printimisel vaja kasutada ka tugistruktuure, kuna detail on vaja printimisalal paigutatada baasmudeliga võrreldes vastaskülje peale. Vajalike tugistruktuuride kogus on siiski väike ja lisab prindiajale ainult 3 minutit.

Lisatud servo abil saab Robotonidiga läbi viia näiteks ülesannet, kus õppur peab roboti peal lipu püsti tõstma. Sel viisil võib robot näiteks märku anda aku tühjenemisest, ootamatust takistusest või eesmärgi täitmisest. Langetatud ja tõstetud lipuga Robotonti kujutab [Joonis 42](#).



*Joonis 42. Näidislahendus servomootori abil lipu püsti tõstmisest. Vasakul langetatud, paremal tõstetud lipuga Robotont.*

Kirjeldatud näidislahendus illustreerib, kui lihtne on 3D-prinditavale kerele uut funktsionaalsust vastavalt vajadusele juurde lisada.

## 6. Arutelu ja järeldused

Selles peatükis esitatakse arutelu, kas käesoleva töö raames leiti vastus peamisele uurimisküsimusele, mis oli järgnev: "Kas Robotondile on võimalik luua senise kerega võrreldava vastupidavusega 3D-prinditav kere, säilitades Robotondi visuaalset identiteeti, optimeerides tootmiskulusid ja parandades tootmise kättesaadavust laiemale kasutajate hulgale?" Tuuakse välja ka kasutuselevõetud versioneerimise süsteemi laiem kasutegur ning mõned perspektiivikad suunad Robotondi kere edasiseks arenduseks.

### 6.1. Robotondi 3D-printimise eelised ja puudused

Töö raames arendatud Robotondi 3D-prinditav kere on suur samm Robotondi arengus. Varasemalt toimus Robotondi tootmine CNC-freesi abil, mille ülesseadmine on kulukas ja ajamahukas protsess. 5 mm paksuse polükarbonaadi ruutmeetrihind jääb vahemikku 30—35 eurot. Robotont gen 2 keredetailide jaoks kulus *ca* 0,4 m<sup>2</sup> 5 mm paksust polükarbonaati, seega toormaterjali maksumus oli *ca* 12—14 eurot. Arvestada tuleb aga, et CNC-freesimise tootmiskulu sõltub detaili geometria keerukusest ja freesitavate avade kogusest [121]. CNC-freesi tellimustööna on Robotont gen 2 keredetailide maksumus varasemalt olnud *ca* 200 eurot komplekt [121].

Terve Robotont gen 3 kere printimiseks kulub *ca* 630 g PLA-d ja *ca* 125 g PETG-d. Ostes mõlemad materjalid tootjalt Prusament, kes toodab filamente just Prusa 3D-printeritega printimiseks, maksab 1 kg mõlemat materjali 29,99 eurot. Seega kogu roboti printimiseks vajaliku filamendi maksumus on *ca* 23 eurot. Tellides metallpuksid populaarse elektroonikakomponentide edasimüüja TME kaudu, maksab ühe roboti jagu metallpukse *ca* 7 eurot [122, 123, 124]. Kogu kandekonstruktsiooni maksumus on seega *ca* 30 eurot, mis on ligi 7 korda vähem kui CNC-freesiga tööstuslikult polükarbonaadist tootes. Erinevalt CNC-freesimisest ei lähe printimisest üle jäänud materjal ka raisku, vaid seda on võimalik kasutada järgmiste detailide printimiseks.

Gen 2 tootmiseks kasutatud CNC-freesimine on tööstluslik-, mitte kodukasutaja lahendus. Gen 3 kere tootmine on aga võimalik kodustes tingimustes, mis võimaldab igapähele, kellel on ligipääs 3D-printerile, printida endale Robotont. Tänu 3D-printimisele on sama lihtne ka Robotondile modifikatsioonide tegemine. Baasmudeli printimiseks kulub küll printeriaega *ca* 54 h, kuid tegelik kasutaja ajakulu hõlmab ainult detailide printimisprotsessi käivitamist ja valmis detailide printerist eemaldamist. Eeldusel, et iga prindi jaoks kulub 20 minutit ning ei esine printeritõrkeid, kulub kasutaja aega kogu Robotondi 9 prindiga printimiseks ainult 3 h. Hinnanguliselt kulub kere CNC-freesiga tootmiseks sama palju aega, kuid see kehtib ainult eeldusel, et kasutajal on freesile ligipääs ning eriteadmised freesiseadistamiseks. Kuna kodukasutajale on CNC-freesi reeglina sobimatu oma ohtlikkuse ja kasutuskeerukuse tõttu, on vaja

detailid tellida, mis sõltuvalt kogusest ja tootjast võib võtta aga nädal kuni kuu [121].

Robotont gen 2 kandekonstruktsiooni mass on ca 1,4 kg. Massi saamiseks leiti esmalt kõigi gen 2 keredetailide ruumala SolidWorks tarkvara *Mass Properties* funktsionaalsuse abil. Seejärel arvutati mass ruumala ja polükarbonaadi tiheduse põhjal. Polükarbonaadi tihedus on 1,20 g/cm<sup>3</sup> [125]. Gen 3 kandekonstruktsioon koosneb 3D-prinditud keredetailidest (ca 0,755 kg) ja metallpuksidest (kokku ca 0,125 kg). Seega kandekonstruktsiooni kogumass on ca 0,880 kg. Toodud kogumasside hinnangus ei ole arvestatud poltide ja mutrite massiga, mis on väheoluline ja mõlema generatsiooni kere puhul sarnane. 3D-prinditava kere arendamise tulemusel vähendati seega Robotondi massi ca 0,5 kg võrra ja gen 3 kere on rohkem kui kolmandiku võrra kergem kui gen 2 kere. Mobiilse roboti puhul on tegu olulise erinevusega, sest väiksem mass võimaldab paremat kiirendust ja pikendab aega kahe akulaadimise vahel.

Eksperimentaalse analüüsi käigus leiti, et 3D-prinditud kere on küll painduvam kui gen 2 kere, kuid kere läbipainde ulatus kuni 10 kg massiga lisaseadmega koormamisel jääb lubatud piiridesse ning ei põhjusta plastset deformatsiooni. Gen 3 kere paindub 10 kg suuruse koormuse all 0,33 mm, gen 2 paindub 0,17 mm. Mõlemad painde suurused on väikese tähtsusega. Leiti, et keres ei teki jäädavat painet ka selle ühe tunni jooksul 10 kg suuruse massiga koormamisel. See tähendab, et ka õppetöös on võimalik näiteks terveks 45-minutiliseks tunniks asetada kere peale kuni 10 kg massiga lisaseadmeid ilma keret kahjustamata.

Eeldatavasti on 3D-prinditud kere mõnevõrra vähem vastupidav kokkupõrgetele, kuid tavakasutuse simulatsiooni käigus kere ei deformeerunud. Kuna kokkupõrke tulemusel kerele rakenduvad jõud sõltuvad ka roboti kogumassist, erinevad täiskomplektse gen 3-ga läbiviidud analüüsi tulemused eeldatavasti veidi simulatsioonist. Testi käigus puudus komplektist pardaarvuti (ca 0,5 kg) ja trükkplaat (väheoluline mass). Samuti ei sõideta tavakasutuses Robotondiga kiiremini kui 0,3 m/s, kuid simuleeritud kokkupõrgete käigus pidas kere vastu kokkupõrgetele kiirusel 0,5 m/s, mis lubab eeldada, et ka täiskomplektne gen 3 on õppetöös kasutamiseks piisavalt vastupidav. Põhjalikuma löögikindluse analüüsi saab läbi viia, kui valmib gen 3 elektroonika.

3D-prinditava kere loomine lisab Robotondile väärtust selle massi, tootmisaja ja tootmiskulu vähendamise kaudu. Samuti väärindab 3D-prinditav kere Robotonti kättesaadavuse suurendamise ja muudatuste tegemise lihtsustamise kaudu, sest viib Robotonti oluliselt lähemale eesmärgile olla igapäevase kättesaadav ja täielikult avatud haridusrobot.

## 6.2. Versioneerimine

Käesoleva töö käigus töötati välja semantilisel versioneerimisel põhinev versioneerimissüsteem Robotondi arendusele. Kuigi see ei olnud töö esialgsete eesmärkide hulgas, osutus see töö käigus vajalikuks. Välja töötatud süsteemi kasulikkuse skoop on aga laiem kui ainult käesolev magistritöö. Ka Robotondi teiste valdkondade arenduses võeti see süsteem kasutusele. Loodud versioneerimissüsteem toetab projekti kasvades Robotondi arendajate arvu suurendamist, mis varem kasutusel olnud süsteemi korral oleks kergemini viinud olukorrani, kus eri arendajate töö liidestamine oluks vaevarikas.

## 6.3. Edasised arengusuunad

Käesoleva magistritöö raames arendati välja Robotont gen3.0.0 kere. Edasiste arenduste käigus saab keret täiustada ja veel rohkem optimeerida 3D-printimise tugevustele. Kuna kere tootmise 3D-printimisele üleviimine on avanud ukse täiendava funktsionaalsuse kiirelt ning odavalt lisamisele ja katsetamisele, on võimalik Robotondi keret senisest rohkem vastavalt vajadustele kohandada.

Alljärgnevalt on toodud mõned võimalikud arendused, mis lisaksid Robotondi disainile väärtust, kuid mis ei mahtunud käesoleva magistritöö skoopi:

1. Robotondi keres on palju avausi, mis küll vähendavad roboti massi, kuid samas võimaldavad võõrkehade ligipääsu roboti sisemistele elementidele nagu elektroonika ja mootorid. Raamimooduli ülemise plaadi disainis saaks proovida rakendada sarnast lähenemist nagu kasutati raamimooduli alumise plaadi puhul, mis prinditi osaliselt täismaterjalist, säilitades siiski materjalisäästuavade lisamisest tingitud massi- ja materjalikokkukohu. Kuna raamimooduli ülemise plaadi materjalisäästuavad on aga samaaegselt kasutusel trükkplaadile hõlpsa ligipääsu tagamiseks, vajab ülemise plaadi avade osaliselt täitmine põhjalikku analüüsi ja testimist, et säilitada avatud ülemise plaadiga samaväärne funktsionaalsus.
2. Robotondi trükkplaat on külgsuunas avatud. Alles gen 3 õppetöös kasutamise käigus selgub, kas see avatus tingib trükkplaadi liiga kergelt kahjustumise või mitte. Edasises arenduses saab seda riski vähendada, lisades raamimooduli ülemise plaadi alla lisakaitseid trükkplaadi serva jaoks. Nende lisatugede disaini jaoks on vaja jälgida, kuidas robotit õppetöös kasutatakse ning millised võimalikud riskid realiseeruvad, et seejärel arendada lisakaitseid just kõige enam ohustatud kohtadesse.
3. Seni on Robotondi rattakoopad alati olnud avatud. Rataste liikumise tulemusel satub aga roboti sisemusse prahti. Seda saaks vältida, kui rattakoopad printida suletult, näiteks mootorimoodulite külge lisatud kaitsete abil. Selle jaoks on vaja robotiga läbi viia katseid erinevatel pinnastel ning uurida, kuidas ja kui palju prahti rataste liikumise mõjul roboti kereesse jõuab. Seejärel saab katsetada

erinevaid kaitsete disaine.

4. Eri mõõtudega pukside koguse vähendamiseks ja kere kokkupanemise hõlbustamiseks saab asendada osa puksidest 3D-prinditud detailidest välja kasvavate 3D-prinditud sammastega. Selle arenduse töökindluses veendumiseks oleks vaja analüüsida ja võrrelda metallpukside ja prinditud sammaste tugevuse erinevusi.

Lisaks kirjeldatud geomeetriaarendustele oleks kasulik uurida rohkem eri materjalide mõju Robotondi kere kvaliteedile. Eriotstarbeliste, suurema vastupidavusega Robotontide arendamise jaoks saab uurida komposiitmaterjalide kasutamist. Kuigi kodukasutajale valdavalt kättesaamatu, võiks näiteks süsiniktäidisega filamendist prinditud Robotont olla tulevikus alternatiiv PLA-st ja PETG-st prinditud Robotondile.

Hindamaks Robotondile pikajaliselt lisaseadmete kinnitamise ohutust oleks kasulik läbi viia mitmepäevane painde mõõtmise katse.

Kasutaja aega kulub kogu kere printimiseks *ca* 3 h. Seda aega on teoreetiliselt võimalik veelgi vähendada, täiendades 3D-printeri G-koodi selliselt, et printeripeaga lükatakse valmis detailid printimisalalt ära ning alustatakse automaatselt uut printi. Sel juhul piirneks kasutaja ajakulu protsessi alustamise ja filamendi vahetamisega. Praktikas võib see Robotondi suhteliselt madalate detailide puhul küll liiga keeruliseks osutuda, kuid oleks sellele vaatamata kasulik uurimissuund.

## Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö eesmärk oli arendada 3D-prinditav kere Tartu Ülikoolis loodud vabavarialisele haridusrobotile Robotont ning seeläbi muuta Robotont laiemale kasutajaskonnale kättesaadavaks ja hõlpsalt täiendatavaks. Tööga otsiti vastust küsimusele, kas Robotondile on võimalik luua senise kerega võrreldava vastupidavusega 3D-prinditav kere, säilitades Robotondi visuaalset identiteeti ja optimeerides tootmiskulusid ja tootmise kättesaadavust laiemale kasutajate hulgale.

Töö käigus loodi välearendusest inspireeritud iteratiivse arendusprotsessi käigus 3D-prinditava Robotondi keredetailide CAD mudelid tarkvara SolidWorks abil. Empiiriliste arvutijuhitavate katsete tulemuste baasil valiti 3D-printimise parameetrid, mis pakuvad optimaalset tasakaalu Robotondi vastupidavuse, massi ja prindiaja vahel. Loodud disaini nõuetele vastavuses veendumiseks viidi läbi empiiriline analüüs kere painduvuse, painde jäävuse ja löögikindluse osas. Analüüsiks vajalik andmehõive sooritati masinnägemisel põhineva skripti abil.

Kõik magistritöö eesmärgid said täidetud. Töö käigus loodi 3D-printimiseks sobilikud CAD mudelid ja printimiseks vajalikud optimeeritud konfiguratsiooni- ja koodifailid. Kõik Robotondi printimiseks ja muutmiseks vajalikud failid avaldati Github keskkonnas, tehes seeläbi võimalikuks Robotondi kodustes tingimustes printimise. Käesoleva töö tulemusel parandati oluliselt Robotondi kui haridusroboti kättesaadavust ja vastavalt vajadusele kiiresti muudetavust. Tänu sellele tõsteti Robotondi väärtust haridusrobotina, sest märkimisväärselt laiendati õpiülesannete hulka, mida on võimalik robotiga läbi viia. Keredetailid on prinditavad 9 prindi, 54 h, 630 g PLA ja 125 g PETG filamendiga.

Loodud keredisain vastab kõigile töö alguses püstitatud nõuetele. Robotondi visuaalne identiteet säilis tänu roboti gabariitide ja üldilme muutumatuna hoidmisele. Keredetailid sobivad kasutamiseks koos teiste gen 3 alammoodulitega nagu elektroonika- ja toitelahendus. Kõik keredetailid on prinditavad kodukasutaja 3D-printeriga, mille printimisala pindala on vähemalt 250x210 mm. Kõik keredetailid on prinditavad täielikult ilma tugistruktuurideta. Empiirilise analüüsi tulemusel veenduti, et kere suudab kanda 10 kg massiga lisaseadmeid ilma märgatava plastse deformatsiooni tekketa. Simuleeritud kokkupõrgete läbiviimise tulemusel veenduti, et kere on tavapärase kasutamise jaoks piisavalt löögikindel ega deformeeru ka tavakasutusest ligi kaks korda suuremal kiirusel toimunud kokkupõrgete korral.

Magistritöö käigus töötati Robotondile välja uus versiooninumbrite süsteem, kuna selgus, et eelmine süsteem ei pakkunud piisavat täpsust versioonide eristamisel. Uus süsteem põhineb semantilisel versioneerimisel, mis on tarkvaraarenduses laialdaselt kasutusel.

Käesoleva töö tulemusel valmisid Robotont gen3.0.0 keredetailid. Robotondi arendus aga jätkub. Loodud muudetavuse võimekust on kavas kasutada Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi õppetöös. Juba juunis 2023 toimub ROS-i koolitus, mille läbiviimiseks kasutatakse Robotont gen3.0.0. Selle jaoks toodetakse viis täiesti uut robotit.

# Tänuavaldused

Teekond magistritöö valmimiseni on pakkunud palju uusi ja huvitavaid avastusi. Tänan oma juhendajaid, Veiko Vunder ja Renno Raudmäe, kes pakkusid mulle lahenduste leidmisel vabadust, kuid olid alati valmis nõu andma.

Lisaks tänan kolleege Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudist, kes on pannud õla alla, et mul oleks rohkem aega kirjutamiseks, ning jaganud asjalikke soovitusi.

Olen siiralt tänulik sõpradele ja perele — Janno, Jürgen, Kristo, Meelis, Liisi, Anu ja Andreas —, kes muutsid kirjutamise protsessi meeldivamaks, pakkudes suurepärasest konstruktiivset kriitikat ja mitmekülgset tuge.

## Viidatud kirjandus

- [1] F. Barreto ja V. Benitti, „Exploring the educational potential of robotics in schools: A systematic review“, *Computers & Education*, kd 58, nr 3, lk 978–988, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.10.006>.
- [2] D. Lancheros-Cuesta ja R. Fabregat, „Educational Robotics Intervention in the Motivation of Students“, *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, kd 17, nr 2, lk 131–139, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/rita.2022.3166856>.
- [3] Tartu Ülikool, „Robotont“. <http://robotont.ut.ee> , Vaadatud: sept 01, 2022. [Online].
- [4] „Veebikursus ‘ROSi algkursus’“. <https://sisu.ut.ee/rosak> , 2022, Vaadatud: märts 08, 2023. [Online].
- [5] S. Schumann, D. Krumins, V. Vunder, A. Aabloo, L. A. Siiman, ja K. Kruusamäe, „A beginner-level MOOC on ROS robotics leveraging a remote web lab for programming physical robots“, under preparation, 2023.
- [6] Fusion3, „How much does a 3D printer cost“. <https://www.fusion3design.com/how-much-does-a-3d-printer-cost/> , apr 2021, Vaadatud: jaan 03, 2023. [Online].
- [7] J. Abraham, „How Much Do CNC Machines Cost? [2023]-Every Type“. <https://mellowpine.com/cnc/how-much-do-cnc-machines-cost/> , veebr 2023, Vaadatud: mai 08, 2023. [Online].
- [8] S. Ziaeeafard, M. H. Miller, M. Rastgaar, ja N. Mahmoudian, „Co-robotics hands-on activities: A gateway to engineering design and STEM learning“, *Robotics and Autonomous Systems*, kd 97, lk 40–50, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.07.013>.
- [9] A. Chatzopoulos, M. Kalogiannakis, S. Papadakis, M. Papoutsidakis, D. Elza, ja S. Psycharis, „DuBot: An Open-Source, Low-Cost Robot for STEM and Educational Robotics“, *Research Anthology on Usage and Development of Open Source Software*, Hershey, PA, USA, 2021, lk 329–353, doi: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-9158-1.ch018>.
- [10] J. Walker, „Computer Aided Design: Vertical Market Application, General Purpose Productivity Tool, or the Heart of Computer Science?“ [https://www.fourmilab.ch/autofile/e5/chapter2\\_44.html](https://www.fourmilab.ch/autofile/e5/chapter2_44.html) , mai 1986, Vaadatud: apr 05, 2023. [Online].
- [11] Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, „SOLIDWORKS for Students“.

- <https://www.solidworks.com/product/students> , Vaadatud: jaan 16, 2023. [Online].
- [12] K. Beck *et al.*, „Manifesto for Agile Software Development“. <http://agilemanifesto.org/> , 2001, Vaadatud: apr 05, 2023. [Online].
- [13] T. Preston-Werner, „Semantic Versioning 2.0.0“. <https://semver.org/> , Vaadatud: märts 06, 2023. [Online].
- [14] International Federation of Robotics, „World Robotics 2022“. [https://ifr.org/downloads/press2018/2022\\_WR\\_extended\\_version.pdf](https://ifr.org/downloads/press2018/2022_WR_extended_version.pdf) , okt 2022, Vaadatud: jaan 15, 2023. [Online].
- [15] Market Research Future, „Mobile Robotics Market Research Report, by Component, Navigation Type, Application, Vertical — Forecast till 2030“. <https://www.marketresearchfuture.com/reports/mobile-robotics-market-1946> , mai 2023, Vaadatud: jaan 15, 2023. [Online].
- [16] Market Research Future, „Global Robotics Market Research Report: Information by Type, Mobility, End User, and Region — Forecast till 2030“. <https://www.marketresearchfuture.com/reports/robotics-market-4732> , aug 2021, Vaadatud: jaan 15, 2023. [Online].
- [17] Iberdrola, S.A., „Do you know how educational robots can help your children to develop?“ <https://www.iberdrola.com/innovation/educational-robots> , Vaadatud: jaan 16, 2023. [Online].
- [18] O. Mubin, C. Stevens, S. Shahid, A. Mahmud, ja J.-J. Dong, „A review of the applicability of robots in education“, *Technology for Education and Learning*, kd 1, juuni 2013, doi: <https://doi.org/10.2316/Journal.209.2013.1.209-0015>.
- [19] M. Kandlhofer ja G. Steinbauer, „Evaluating the impact of educational robotics on pupils’ technical- and social-skills and science related attitudes“, *Robotics and Autonomous Systems*, kd 75, lk 679–685, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.09.007>.
- [20] A. M. Ortiz, „Examining students’ proportional reasoning strategy levels as evidence of the impact of an integrated LEGO robotics and mathematics learning experience“, *Journal of Technology Education*, kd 26, lk 46–69, jaan 2015.
- [21] J. Leoste ja M. Heidmets, „The Impact of Educational Robots as Learning Tools on Mathematics Learning Outcomes in Basic Education“, 2019, lk 203–217.

- [22] E. Afari ja M. Khine, „Robotics as an Educational Tool: Impact of Lego Mindstorms“, *International Journal of Information and Education Technology*, kd 7, lk 437–442, jaan 2017, doi: <https://doi.org/10.18178/ijiet.2017.7.6.908>.
- [23] E. Bilotta, L. Gabriele, R. Servidio, ja A. Tavernise, „Edutainment Robotics as Learning Tool“, *Transactions on Edutainment III*, Z. Pan, A. D. Cheok, W. Müller, ja M. Chang, Toim Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, lk 25–35.
- [24] A. Chatzopoulos, M. Kalogiannakis, S. Papadakis, ja M. Papoutsidakis, „A Novel, Modular Robot for Educational Robotics Developed Using Action Research Evaluated on Technology Acceptance Model“, *Education Sciences*, kd 12, nr 4, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/educsci12040274>.
- [25] M. Quigley *et al.*, „ROS: an open-source Robot Operating System“, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, mai 2009, [Online]. Available at: <http://robotics.stanford.edu/ang/papers/icraoss09-ROS.pdf>.
- [26] A. Zdešar, S. Blažic, ja G. Klancar, „Engineering Education in Wheeled Mobile Robotics“, *IFAC-PapersOnLine*, kd 50, nr 1, lk 12173–12178, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2149>.
- [27] N. M. S. Consulting, „ROS Based Robot Market by Robot Type - Global Opportunity Analysis and Industry Forecast 2022-2030“. <https://www.nextmsc.com/report/ros-based-robot-market> , märts 2022, Vaadatud: apr 30, 2023. [Online].
- [28] N. M. S. Consulting, „Industrial Robotics Market by Type and Geography - Global Opportunity Analysis and Industry Forecast 2022-2030“. <https://www.nextmsc.com/report/industrial-robotics-market> , märts 2022, Vaadatud: apr 30, 2023. [Online].
- [29] J. M. Jimeno, „Linorobot“. <https://linorobot.org/> , 2017, Vaadatud: jaan 15, 2023. [Online].
- [30] Duckieworks Ltd, „Duckiebot“. <https://get.duckietown.com/products/duckiebot-db21> , Vaadatud: jaan 15, 2023. [Online].
- [31] Robotis Inc., „TurtleBot3“. <https://www.robotis.us/turtlebot-3/> , Vaadatud: jaan 15, 2023. [Online].
- [32] Clearpath Robotics Inc., „TurtleBot4“. <https://clearpathrobotics.com/turtlebot-4/> , Vaadatud: jaan 15, 2023. [Online].
- [33] Husarion sp. z o.o., „ROSbot“. <https://store.husarion.com/products/rosbot> , Vaadatud: jaan 15, 2023. [Online].

- [34] ASTM International, *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. .
- [35] I. Chavdarov, V. Nikolov, B. Naydenov, ja G. Boiadjiev, „Design and Control of an Educational Redundant 3D Printed Robot“, *2019 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2019, lk 1–6, doi: <https://doi.org/10.23919/softcom.2019.8903825>.
- [36] M. H. Ali, S. Batai, ja D. Sarbassov, „3D printing: a critical review of current development and future prospects“, *Rapid Prototyping Journal*, kd 25, nr 6, lk 1108–1126, 2019, doi: <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2018-0293>.
- [37] T. Snyder *et al.*, „3D Systems Technology Overview and New Applications in Manufacturing, Engineering, Science, and Education“, *3D Printing and Additive Manufacturing*, kd 1, lk 169–176, sept 2014, doi: <https://doi.org/10.1089/3dp.2014.1502>.
- [38] Fast Radius, „Why does 3D printing layer height matter?“ <https://www.fastradius.com/resources/why-3d-printing-layer-height-matter/> , nov 2021, Vaadatud: jaan 11, 2023. [Online].
- [39] E. Brinksmeier, G. Levy, D. Meyer, ja A. B. Spierings, „Surface integrity of selective-laser-melted components“, *CIRP Annals*, kd 59, nr 1, lk 601–606, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.131>.
- [40] H. Rafi, K. Nadimpalli, H. Gong, T. Starr, ja B. Stucker, „Microstructures and Mechanical Properties of Ti6Al4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting“, *Journal of Materials Engineering and Performance*, kd 22, lk 3872–3883, aug 2013, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0658-0>.
- [41] Formlabs, „Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing“. <https://formlabs.com/eu/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/> , Vaadatud: mai 04, 2023. [Online].
- [42] AmeraLabs, „The Complete Resin 3D Printing Settings Guide for Beginners“. <https://ameralabs.com/blog/the-complete-resin-3d-printing-settings-guide-for-beginners/> , Vaadatud: mai 04, 2023. [Online].
- [43] P. Hanzl, M. Zetek, T. Bakša, ja T. Kroupa, „The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of SLM Parts“, *Procedia Engineering*, kd 100, lk 1405–1413, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.510>.
- [44] I. Raise 3D Technologies, „What is 3D Printer Filament?“ <https://www.raise3d.com/academy/what->

[is-3d-printer-filament/](#) , Vaadatud: apr 25, 2023. [Online].

[45] P. K. Gurralla ja S. P. Regalla, „Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling“, *Virtual and Physical Prototyping*, kd 9, nr 3, lk 141–149, 2014, doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2014.913400>.

[46] S. L. Garbett, „Everything 3D: Exploring Every 3D Printing Technology Available in 2022“. <https://www.makeuseof.com/every-3d-printing-technology-available/> , juuni 2022, Vaadatud: mai 04, 2023. [Online].

[47] P. K. Penumakala, J. Santo, ja A. Thomas, „A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites“, *Composites Part B: Engineering*, kd 201, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108336>.

[48] A. Bellini ja S. Güçeri, „Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling“, *Rapid Prototyping Journal*, kd 9, lk 252–264, okt 2003, doi: <https://doi.org/10.1108/13552540310489631>.

[49] CNC Kitchen, „Comparing PLA, PETG & ASA - feat. Prusament“. <https://www.cnckitchen.com/blog/comparing-pla-petg-amp-asa-feat-prusament> , veebr 2020, Vaadatud: jaan 31, 2023. [Online].

[50] A. Rodríguez-Panes, J. Claver, ja A. M. Camacho, „The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis“, *Materials*, kd 11, nr 8, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/ma11081333>.

[51] J. Kocí, „Everything you need to know about infills“. [https://blog.prusa3d.com/everything-you-need-to-know-about-infills\\_43579/](https://blog.prusa3d.com/everything-you-need-to-know-about-infills_43579/) , jaan 2021, Vaadatud: apr 30, 2023. [Online].

[52] M. Fernandez-vicente, W. Calle, S. Ferrándiz, ja A. Conejero, „Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing“, *3D Printing and Additive Manufacturing*, kd 3, lk 183–192, sept 2016, doi: <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0036>.

[53] M. T. Biroosz, D. Ledenyák, ja M. Andó, „Effect of FDM infill patterns on mechanical properties“, *Polymer Testing*, kd 113, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107654>.

[54] Z. Hay, „3D Printing Elephant’s Foot – Easy Fixes“. <https://all3dp.com/2/elephant-s-foot-3d-printing-problem-easy-fixes/> , juuli 2022, Vaadatud: apr 25, 2023. [Online].

- [55] D. Durbin, UltiMaker BV, „How much does a 3D printer cost?“ <https://ultimaker.com/learn/how-much-does-a-3d-printer-cost> , jaan 2022, Vaadatud: apr 24, 2023. [Online].
- [56] R. B. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, Ubaidillah, ja Z. Arifin, „A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters“, *Open Engineering*, kd 11, nr 1, lk 639–649, 2021, doi: <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>.
- [57] D. Fico, D. Rizzo, R. Casciaro, ja C. Corcione, „A Review of Polymer-Based Materials for Fused Filament Fabrication (FFF): Focus on Sustainability and Recycled Materials“, *Polymers*, kd 14, lk 465, jaan 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/polym14030465>.
- [58] L. Carolo, „What Is FDM 3D Printing? – Simply Explained“. <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/> , juuni 2022, Vaadatud: jaan 13, 2023. [Online].
- [59] G. Slump, „PLA vs ABS vs PETG: The Main Differences“. <https://all3dp.com/2/pla-vs-abs-vs-petg-differences-compared/> , nov 2022, Vaadatud: jaan 13, 2023. [Online].
- [60] 3D Natives, „All you need to know about PEEK for 3D printing“. <https://www.3dnatives.com/en/peek-3d-printing-060420204> , apr 2020, Vaadatud: jaan 13, 2023. [Online].
- [61] P. R. a.s., „Material guide: PETG“. [https://help.prusa3d.com/article/petg\\_2059](https://help.prusa3d.com/article/petg_2059) , Vaadatud: jaan 13, 2023. [Online].
- [62] L. Carolo, „3D Printer Material Cost: An Overview“. <https://all3dp.com/2/3d-printer-material-cost-the-real-cost-of-3d-printing-materials/> , nov 2021, Vaadatud: jaan 13, 2023. [Online].
- [63] Tractus3D, „PEEK material“. <https://tractus3d.com/materials/peek/> , Vaadatud: jaan 14, 2023. [Online].
- [64] P. R. a.s., „Material guide: ASA“. [https://help.prusa3d.com/article/asa\\_1809](https://help.prusa3d.com/article/asa_1809) , Vaadatud: jaan 30, 2023. [Online].
- [65] „Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA)“. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Acrylonitrile-Styrene-Acrylate-ASA> , Vaadatud: jaan 30, 2023. [Online].
- [66] „Polylactic Acid (PLA, Polylactide)“. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Polylactic-Acid-PLA-Polylactide> , Vaadatud: jaan 30, 2023. [Online].
- [67] „Glycol-Modified Polyethylene Terephthalate (PETG, PET-G)“.

- <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Glycol-Modified-Polyethylene-Terephthalate-PETG-PET-G> , Vaadatud: jaan 30, 2023. [Online].
- [68] „Polyetheretherketone (PEEK)“: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Unfilled-PEEK> , Vaadatud: jaan 30, 2023. [Online].
- [69] „Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)“: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Unfilled-ABS> , Vaadatud: jaan 30, 2023. [Online].
- [70] R. Hawkes, J. Iqbal, F. Mansour, M. Milner-Bolotin, ja P. Williams, *Physics for Scientists and Engineers: An Interactive Approach, 1st Edition*. Toronto: Cengage, 2014, lk 265–268.
- [71] M. Algarni ja S. Ghazali, „Comparative Study of the Sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG’s Mechanical Properties to FDM Printing Process Parameters“, *Crystals*, kd 11, nr 8, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/cryst11080995>.
- [72] L. Carolo, „3D Printing ASA: The Best Settings & Printing Tips“: <https://all3dp.com/2/3d-printing-asa/> , nov 2022, Vaadatud: mai 01, 2023. [Online].
- [73] Anisoprint Sarl, „Desktop Anisoprinting“: <https://anisoprint.com/solutions/desktop/> , Vaadatud: märts 12, 2023. [Online].
- [74] R. Toor, Filamentive Limited, „The 3D Printing Waste Problem“: <https://www.filamentive.com/the-3d-printing-waste-problem/> , nov 2019, Vaadatud: mai 04, 2023. [Online].
- [75] Treatstock, „CNC vs 3D Printing – a comparative guide“: <https://www.treatstock.com/guide/article/112-cnc-vs-3d-printing-a-comparative-guide> , Vaadatud: jaan 14, 2023. [Online].
- [76] A. Giencke, „CNC vs 3D Printer: The Differences Simply Explained“: <https://all3dp.com/2/cnc-vs-3d-printer-comparison/> , apr 2023, Vaadatud: mai 04, 2023. [Online].
- [77] A. T. P. M. Ltd., „CNC Machining vs. 3D Printing: Which One Is Best for Your Project?“ <https://at-machining.com/cnc-machining-vs-3d-printing/> , apr 2023, Vaadatud: mai 04, 2023. [Online].
- [78] S.-H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, ja P. K. Wright, „Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS“, *Rapid Prototyping Journal*, kd 8, nr 4, lk 248–257, 2002, doi: <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>.
- [79] M. J. Franchetti ja C. G. Kress, „An economic analysis comparing the cost feasibility of replacing

injection molding processes with emerging additive manufacturing techniques“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, kd 88, lk 2573–2579, 2017.

[80] Xometry, „What is the 3D Printing vs Injection Molding Cost-per-Unit Breakeven?“ <https://www.xometry.com/resources/injection-molding/injection-molding-vs-3d-printing/> , sept 2020, Vaadatud: mai 04, 2023. [Online].

[81] F. Hamidi *et al.*, „Using Robotics and 3D Printing to Introduce Youth to Computer Science and Electromechanical Engineering“, *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, 2017, lk 942–950, doi: <https://doi.org/10.1145/3027063.3053346>.

[82] J. Yu, S. D. Han, W. N. Tang, ja D. Rus, „A portable, 3D-printing enabled multi-vehicle platform for robotics research and education“, *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017, lk 1475–1480, doi: <https://doi.org/10.1109/icra.2017.7989176>.

[83] B. Cronin, „Anansi Hexapod Robot“. <https://github.com/BryceCronin/AnansiHexapodRobot> , juuni 2021, Vaadatud: jaan 04, 2023. [Online].

[84] M. Niewiadomski, Kawasaki Robotics, „ASTORINO: 3D printed robots for educational robotics“. <https://www.tiesserobot.com/astorino-3d-robot-educational-robotics> , 2022, Vaadatud: jaan 03, 2023. [Online].

[85] M. Voellmy ja M. Ehrhardt, „ExoMy: A Low Cost 3D Printed Rover“, okt 2020.

[86] Y. Ni *et al.*, „A Novel Wheel-Legged Hexapod Robot“, *Biomimetics*, kd 7, nr 4, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/biomimetics7040146>.

[87] T. Kozuki *et al.*, „Skeletal structure with artificial perspiration for cooling by latent heat for musculoskeletal humanoid Kengoro“, *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016, lk 2135–2140, doi: <https://doi.org/10.1109/iros.2016.7759335>.

[88] G. Langevin, „InMoov“. <https://inmoov.fr/> , Vaadatud: jaan 04, 2023. [Online].

[89] M. Wehner *et al.*, „An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots“, *Nature*, kd 536, lk 451–455, 2016, doi: <https://doi.org/10.1038/nature19100>.

[90] E. Ackerman, „Boston Dynamics’ Marc Raibert on Next-Gen ATLAS: ‘A Huge Amount of Work’“. <https://spectrum.ieee.org/boston-dynamics-marc-raibert-on-nextgen-atlas> , veebr 2016, Vaadatud: jaan

04, 2023. [Online].

[91] R. Raudmäe *et al.*, „ROBOTONT – open-source and ROS-supported omnidirectional mobile robot for education and research“, under preparation, 2023.

[92] Makeblock, „mBot“. <https://www.makeblock.com/mbot-3> , Vaadatud: sept 21, 2022. [Online].

[93] Sphero, Inc., „Sphero“. <https://sphero.com/> , Vaadatud: sept 21, 2022. [Online].

[94] The LEGO Group, „Lego Mindstorms EV3“. <https://www.lego.com/en-us/product/lego-mindstorms-ev3-31313> , Vaadatud: sept 21, 2022. [Online].

[95] „Veebikursus ‘ROSi algkursus: Tutvume Robotondiga’“. <https://sisu.ut.ee/rosak/tutvume-robotondiga> , 2022, Vaadatud: apr 28, 2023. [Online].

[96] R. Vellerind, „Avatud robotiareendusplatvormi ROS võimekuse loomine Tartu Ülikooli Robotexi robootikaplatvormile“, *Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudi bakalaureusetöö*, 2017, [Online]. Available at: [https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/56559/Vellerind\\_BA2017.pdf](https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/56559/Vellerind_BA2017.pdf).

[97] R. Raudmae, „Avatud robotplatvorm Robotont“, *Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudi magistritöö*, 2019, [Online]. Available at: [https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/64341/Raudmae\\_MSc2019.pdf](https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/64341/Raudmae_MSc2019.pdf).

[98] M. K. Nigol, „Õppematerjalid robotplatvormile Robotont“, *Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudi magistritöö*, 2019, [Online]. Available at: [https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/64339/Nigol\\_MSc2019.pdf](https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/64339/Nigol_MSc2019.pdf).

[99] Tartu Ülikool, „Robotont, publikatsioonid“. <http://robotont.ut.ee/publikatsioonid> , Vaadatud: sept 21, 2022. [Online].

[100] Tartu Ülikool, „Robotont, õppematerjalid“. <http://robotont.ut.ee/%C3%B5ppematerjalid> , Vaadatud: sept 21, 2022. [Online].

[101] „What materials can laser cutters cut“. <https://laserhints.com/what-materials-can-laser-cutters-cut/> , Vaadatud: sept 21, 2022. [Online].

[102] HobbyKing, „Turnigy High Capacity 5200mAh 4S 12C Lipo Pack w/XT60“. [https://hobbyking.com/en\\_us/turnigy-high-capacity-5200mah-4s-12c-multi-rotor-lipo-pack-w-xt60.html?](https://hobbyking.com/en_us/turnigy-high-capacity-5200mah-4s-12c-multi-rotor-lipo-pack-w-xt60.html?) , Vaadatud: sept 01, 2022. [Online].

- [103] Makita, „PowerPack LXT 197626-8“. <https://www.makita.ee/product/197626-8.html> , Vaadatud: mai 05, 2023. [Online].
- [104] Prusa Research a.s., „The Original Prusa i3 MK3S+“. <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-i3-mk3s-kit-3/#Specs> , Vaadatud: okt 25, 2022. [Online].
- [105] Prusa Research a.s., „PrusaSlicer“. [https://www.prusa3d.com/page/prusaslicer\\_424/](https://www.prusa3d.com/page/prusaslicer_424/) , Vaadatud: jaan 16, 2023. [Online].
- [106] D. Gershgorn ja S. Brewster, „The Best 3D Printer“. <https://www.nytimes.com/wirecutter/reviews/best-home-3d-printer/> , apr 2023, Vaadatud: jaan 16, 2023. [Online].
- [107] „AEL-A Motorized Test Stand“. <https://www.truetronixonline.com/pdf/file/AEL-A%20Motorized%20Test%20Stand%20User%20Manual.pdf> , Vaadatud: märts 13, 2023. [Online].
- [108] „LK-G82 Sensor Head: Multi-Purpose, Small spot“. <https://www.keyence.com/products/measure/laser-1d/lk-g3000/models/lk-g82/> , Vaadatud: märts 27, 2023. [Online].
- [109] S. Basu, „Semantic Versioning: How to version the PCB schematic and layout“. <https://hutscape.com/checklists/versioning> , Vaadatud: märts 06, 2023. [Online].
- [110] „Version Control for Open Source Hardware“. <https://www.instructables.com/Version-Control-for-Open-Source-Hardware/> , Vaadatud: märts 06, 2023. [Online].
- [111] R. I. Amet, „RIHA versioneerimine“. <https://github.com/e-gov/RIHA-Index/blob/master/Versioneerimine.md> , mai 2017, Vaadatud: mai 06, 2023. [Online].
- [112] 3D HUBS B.V., „What is FDM (fused deposition modeling) 3D printing?“. <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/#what-are-common-materials-for-fdm-3d-printing> , Vaadatud: jaan 13, 2023. [Online].
- [113] L. Kivelä, „3D Print Warping: PLA, PETG, ABS – 3 Easy Fixes“. <https://all3dp.com/2/3d-print-warping-what-it-is-how-to-fix-it/> , dets 2022, Vaadatud: jaan 13, 2023. [Online].
- [114] M. Rodriguez, „All About Dovetail Joints“. <https://www.finewoodworking.com/2005/09/12/all-about-dovetail-joints> , sept 2005, Vaadatud: nov 30, 2022. [Online].
- [115] H. Chavasse, „Dovetail joints in antique furniture“. <https://antique->

[collecting.co.uk/2015/08/25/dovetail-joints-in-antique-furniture/](http://collecting.co.uk/2015/08/25/dovetail-joints-in-antique-furniture/) , aug 2015, Vaadatud: mai 07, 2023. [Online].

[116] E. Martinson, „Mechanical Design for 3D Printing“, *The Adventures of Eiki Martinson*, nov 2012, Vaadatud: nov 30, 2022. [Online]. Available at: <http://eikimartinson.com/engineering/3dparts/#dovetail>.

[117] „robotont-mechanics“. <https://github.com/robotont/robotont-mechanics> , Vaadatud: mai 08, 2023. [Online].

[118] I. Corporation, „Mechanical Drawings for Intel NUC, NUC12WSK“. <https://www.intel.com/content/www/us/en/support/articles/000006820/intel-nuc.html> , Vaadatud: mai 08, 2023. [Online].

[119] Torq Pro & Tower Pro, „MG996R servo“. <https://www.towerpro.com.tw/product/mg996r/> , Vaadatud: mai 03, 2023. [Online].

[120] V. Rovinskiy, „MG996R Servo motor“. <https://grabcad.com/library/mg996r-servo-motor-1> , Vaadatud: mai 03, 2023. [Online].

[121] R. Raudmäe, isiklik kommunikatsioon, apr 2023.

[122] T. M. E. S. z o.o., „Bossard screwed spacer sleeve 6mm 1384759“. [https://www.tme.eu/ee/details/b3x6\\_bn3318/metallpuksid/bossard/1384759/](https://www.tme.eu/ee/details/b3x6_bn3318/metallpuksid/bossard/1384759/) , Vaadatud: mai 08, 2023. [Online].

[123] T. M. E. S. z o.o., „Dremec screwed spacer sleeve 15mm 223X15“. [https://www.tme.eu/ee/details/tfm-m3x15\\_dr223/metallpuksid/dremec/223x15/](https://www.tme.eu/ee/details/tfm-m3x15_dr223/metallpuksid/dremec/223x15/) , Vaadatud: mai 08, 2023. [Online].

[124] T. M. E. S. z o.o., „Dremec screwed spacer sleeve 40mm 123X40“. [https://www.tme.eu/ee/details/tff-m3x40\\_dr123/metallpuksid/dremec/123x40/](https://www.tme.eu/ee/details/tff-m3x40_dr123/metallpuksid/dremec/123x40/) , Vaadatud: mai 08, 2023. [Online].

[125] B. P. Federation, „Polycarbonate (PC)“. <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/Polycarbonate.aspx> , Vaadatud: apr 28, 2023. [Online].

## **Lisa 1: Mõõtelaseri ekraanilt lugemi tuvastamise skript**

Pythoni skript, mille abil tuvastati mõõtelaseri lugem, asub koos näidissisendiga veebiaadressil:  
<https://github.com/ut-ims-robotics/thesis-robotont-gen3.0.0-chassis/tree/main/analysis>

## **Lisa 2: Kere disaini- ja tootmisfailid**

Töö käigus välja töötatud CAD failid ja 3D-printimiseks vajalikud failid asuvad veebiaadressil:  
<https://github.com/ut-ims-robotics/thesis-robotont-gen3.0.0-chassis/tree/main/production>

### Lisa 3: Keredetailide individuaalsed massid ja prindiajad

Moodul	Detail (versioon)	Mass (g)	Prindiaeg
Raamimoodul	Ülemine esitükk (gen3.0.0-ver1.0.0+1.4)	67	4 h 43 min
	Ülemine vasak tagatükk (gen3.0.0-ver1.0.0+1.5)	81	5 h 41 min
	Ülemine parem tagatükk (gen3.0.0-ver1.0.0+1.5)	79	5 h 34 min
	Alumine esitükk (gen3.0.0-ver1.0.0+1.5)	61	4 h 11 min
	Alumine vasak tagatükk (gen3.0.0-ver1.0.0+1.4)	77	5 h 27 min
	Alumine parem tagatükk (gen3.0.0-ver1.0.0+1.4)	77	5 h 30 min
	<b>Kokku</b>	<b>442</b>	<b>31 h 11 min</b>
Mootorimoodul	Esitükk (gen3.0.0-ver1.0.0+1.4)	15	1 h 15 min
	Tagatükk (gen3.0.0-ver1.0.0+1.4)	11	54 min
	Küljetükk (gen3.0.0-ver1.0.0+1.5)	8 (x2)	37 min (x2)
	<b>Kokku</b>	<b>42 (x3)</b>	<b>3 h 23 min (x3)</b>
Arvutimoodul	Alumine plaat (gen3.0.0-ver1.0.0+1.3)	57	3 h 54 min
	Ülemine plaat (gen3.0.0-ver1.0.0+1.2)	53	3 h 28 min
	<b>Kokku</b>	<b>110</b>	<b>7 h 22 min</b>
Kaameramoodul	Vasak külg (gen3.0.0-ver1.0.0+1.3)	33	2 h 15 min
	Parem külg (gen3.0.0-ver1.0.0+1.3)	33	2 h 14 min
	Kaameratagune (gen3.0.0-ver1.0.0+1.4)	11	53 min
	<b>Kokku</b>	<b>77</b>	<b>5 h 22 min</b>
<b>Detailid kokku</b>		<b>755</b>	<b>53 h 59 min</b>

# Lihtlitsents

## Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Eva Mõtshärg,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

### **3D-prinditava kere disain ja analüüs vabavaralisele haridusrobotile Robotont,**

mille juhendajad on Veiko Vunder ja Renno Raudmäe,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Eva Mõtshärg

09.05.2023